

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YENİ BİR YUMUŞAK ANAHTARLAMALI  
DC-DC PWM DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN  
TASARIM, ANALİZ VE UYGULAMASI**

Elektrik Yüksek Mühendisi İsmail AKSOY

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında  
Hazırlanan**

**DOKTORA TEZİ**

**Tez Savunma Tarihi** : 2 Ekim 2007  
**Tez Danışmanı** : Prof. Dr. Hacı BODUR (YTÜ)  
**Jüri Üyeleri** : Prof. Remzi GÜLGÜN (YTÜ)  
: Doç. Dr. M. Hadi SARUL (YTÜ)  
: Prof. Dr. Nurettin ABUT (Kocaeli Ü.)  
: Prof. Dr. Faik MERGEN (İTÜ)

**İSTANBUL, 2007**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	iv
KISALTMA LİSTESİ .....	vi
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	ix
ÖNSÖZ.....	x
ÖZET .....	xi
ABSTRACT .....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. YUMUŞAK ANAHTARLAMA ve BASTIRMA HÜCRESİ KAVRAMI .....	7
2.1 Giriş .....	7
2.2 Anahtarlama Kavramı.....	7
2.2.1 Omik Yüklü bir DC Kıyıcı .....	7
2.2.2 Düşük Çıkışlı bir DC-DC Dönüştürücü.....	10
2.3 Anahtarlama ve Dönüştürme Özellikleri .....	12
2.4 Yumuşak Anahtarlama ve Bastırma Hücresi Kavramı.....	13
2.5 Yumuşak Anahtarlama Teknikleri.....	14
2.5.1 Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS).....	14
2.5.2 Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS) .....	15
2.5.3 Sıfır Akımda Geçiş (ZCT) .....	16
2.5.4 Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT) .....	16
2.6 Bastırma Hücrelerinin Sınıflandırılması.....	16
2.7 Bastırma Hücrelerinin Karşılaştırılması .....	19
2.8 Sonuç .....	20
3. TEMEL ZVT PWM DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ .....	21
3.1 Giriş .....	21
3.2 Tanım ve Kabuller .....	21
3.3 Çalışma Aralıkları.....	22
3.4 Sonuç .....	28
4. TEMEL ZCT PWM DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ .....	29
4.1 Giriş .....	29
4.2 Tanım ve Kabuller .....	29
4.3 Çalışma Aralıkları.....	30
4.4 Sonuç .....	34

5.	ZCZVT PWM DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ .....	35
5.1	Giriş .....	35
5.2	Tanım ve Kabuller .....	35
5.3	Çalışma Aralıkları.....	35
5.4	Sonuç .....	44
6.	YENİ BİR ZVT-ZCT-PWM YÜKSEK ÇIKIŞLI DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ ....	45
6.1	Giriş .....	45
6.2	Tanım ve Kabuller .....	45
6.3	Çalışma Aralıkları.....	46
6.4	Ek Çalışma Aralıkları .....	56
6.5	Yumuşak Anahtarlama Şartları .....	60
6.5.1	Ana anahtarın ZVT ile ilettime girmesi .....	60
6.5.2	Ana anahtarın ZCT ile kesime girmesi .....	60
6.5.3	Yardımcı anahtarın ZCS ile ilettime girmesi .....	60
6.5.4	Yardımcı anahtarın ZCT ile kesime girmesi .....	60
6.6	Dönüştürücüye ait Karakteristik Eğriler ve Dizayn İşlemi.....	61
6.6.1	Karakteristik Eğriler .....	61
6.6.2	Dizayn İşlemi.....	66
6.7	Dönüştürücünün Özellikleri .....	67
7.	YENİ ZVT-ZCT-PWM YÜKSEK ÇIKIŞLI DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN UYGULAMASI .....	69
7.1	Giriş .....	69
7.2	Devre Şeması .....	69
7.3	Uygulama Devresi .....	70
7.4	Uygulama Sonuçları .....	71
8.	SONUÇLAR.....	83
	KAYNAKLAR.....	85
	ÖZGEÇMİŞ.....	88

## SİMGE LİSTESİ

$C_F$	Çıkış filtre kondansatörü
$C_p$	Eşdeğer parazitik kondansatör
$C_s$	Bastırma kondansatörü
$D_F$	Ana diyot
$D_1$	Ana anahtarın dahili diyodu
$D_2$	Yardımcı anahtarın dahili diyodu
$D_3$	Yardımcı diyot
$D_4$	Yardımcı diyot
$f_p$	Anahtarlama, çalışma veya darbe frekansı
$i_{DF}$	Ana diyot akımı
$i_{CON}$	Transistorün içinden geçen akım
$I_{CS}$	Transistörün doyum akımı
$I_i$	Giriş akımı
$I_o$	Yük akımı
$i_{Lsa}$	Alt bastırma endüktansı akımı
$i_{Lsb}$	Üst bastırma endüktansı akımı
$L_e$	Eşdeğer paralel endüktans
$L_F$	Ana endüktans
$L_s$	Eşdeğer seri endüktans
$L_{sa}$	Üst bastırma endüktansı
$L_{sb}$	Alt bastırma endüktansı
$P_{CON}$	İletim güç kaybı
$P_{SW}$	Anahtarlama güç kaybı
$P_{TOT}$	Toplam güç kaybı
$R_o$	Yük direnci
$S_1$	Ana anahtar
$S_2$	Yardımcı anahtar
$t_f$	Transistör akımının yükselme süresi
$t_{ON}$	Anahtarın iletme girme süresi
$t_{OFF}$	Anahtarın kesime girme süresi
$T_p$	Anahtarlama periyodu
$t_r$	Transistör akımının düşme süresi
$T_1$	Ana anahtarın transistörü
$V_{CEsat}$	Transistörün doyum gerilimi
$V_{CON}$	Transistor ün iletim gerilim düşümü
$V_{Cp}$	Parazitik kondansatörün gerilimi
$V_{Cs}$	Bastırma kondansatör gerilimi
$V_{Csmax}$	Bastırma kondansatör geriliminin maksimum değeri
$V_{D3}$	$D_3$ yardımcı diyot gerilimi
$V_{D4}$	$D_4$ yardımcı diyot gerilimi
$V_{S1}$	Ana anahtar uçlarındaki gerilim
$V_{S2}$	Yardımcı uçlarındaki gerilim
$V_i$	Giriş gerilimi
$V_o$	Çıkış gerilimi
$\omega_e$	Rezonans açısal frekansı
$\omega_1$	Rezonans açısal frekansı
$\omega_2$	Rezonans açısal frekansı
$\omega_3$	Rezonans açısal frekansı
$W_{CON}$	İletim durumundaki enerji kaybı

$W_{ON}$	İletime girme işlemindeki enerji kaybı
$W_{OFF}$	Kesime girme işlemindeki enerji kaybı
$W_{BLO}$	Kesim durumundaki enerji kaybı
$Z_e$	Eşdeğer rezonans empedansı
$Z_1$	Eşdeğer rezonans empedansı
$Z_2$	Eşdeğer rezonans empedansı
$Z_3$	Eşdeğer rezonans empedansı
$\lambda$	Bağıl iletim süresi veya iletim/kesim oranı

## KISALTMA LİSTESİ

BJT	Bipolar Transistör (Bipolar Junction Transistor)
DC	Doğru Akım (Direct Current)
EMI	Elektromanyetik Girişimi (Electro-magnetic Interference)
IGBT	İzole Kapılı Bipolar Transistör (Insulated Gate Bipolar Transistor)
MOSFET	Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
HS	Sert Anahtarlama (Hard Switching)
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
RFI	Radyo Frekans Girişimi (Radio-frequency Interference)
SS	Yumuşak Anahtarlama (Soft Switching)
ZCS	Sıfır Akımda Anahtarlama (Zero Current Switching)
ZCT	Sıfır Akımda Geçiş (Zero Current Transition)
ZVS	Sıfır Gerilimde Anahtarlama (Zero Current Switching)
ZVT	Sıfır Gerilimde Geçiş (Zero Voltage Transition)
ZCZVT	Sıfır Akımda ve Sıfır Gerilimde Geçiş (Zero Current and Zero Voltage Transition)

## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	(a) Omik yüklü bir DC kıyıcının devre şeması ve (b) temel dalga şekilleri (Bodur vd., 2002).....	8
Şekil 2.2	Düşük çıkışlı bir DC-DC dönüştürücünün (a) devre şeması, (b) temel dalga şekilleri (Bodur vd., 2002).....	11
Şekil 2.3	(a) Bir anahtarlama güç elemanın kontrol sinyali ile (b) HS, (c) ZCS ile ZVS ve (d) ZCT ile ZVT çalışmalarıyla ilgili temel dalga şekilleri (Bodur vd., 2002). ....	15
Şekil 2.4	Bastırma hücrelerinin genel olarak sınıflandırılması (Bodur vd., 2002).....	18
Şekil 2.5	Bastırma hücrelerinin gelişmişlik açısından sınıflandırılması (Bodur vd., 2002)...	18
Şekil 3.1	Temel ZVT PWM DC-DC dönüştürücünün devre şeması (Hua vd., 1994). ....	21
Şekil 3.2	Temel ZVT PWM DC-DC dönüştürücünün eşdeğer çalışma aralıkları. ....	23
Şekil 3.3	Temel ZVT dönüştürücünün temel dalga şekilleri. ....	25
Şekil 4.1	Temel ZCT PWM DC-DC dönüştürücünün devre şeması (Hua vd., 1994). ....	29
Şekil 4.2	Temel ZCT PWM DC-DC dönüştürücünün eşdeğer çalışma aralıkları.....	31
Şekil 4.3	Temel ZCT dönüştürücünün temel dalga şekilleri. ....	32
Şekil 5.1	ZCZVT PWM DC-DC dönüştürücünün devre şeması (Stein vd., 2000).....	35
Şekil 5.2	ZCZVT PWM DC-DC dönüştürücünün eşdeğer çalışma aralıkları. ....	37
Şekil 5.3	ZCZVT dönüştürücünün temel dalga şekilleri. ....	40
Şekil 6.1	Sunulan yeni ZVT-ZCT-PWM yüksek çıkışlı dönüştürücü. ....	45
Şekil 6.2	Sunulan dönüştürücüde çalışma aralıklarının eşdeğer devreleri. ....	49
Şekil 6.3	Sunulan dönüştürücüye ait temel dalga şekilleri. ....	51
Şekil 6.4	Ek Çalışma Aralıkları. ....	56
Şekil 6.5	Ek Eşdeğer Devre Şemaları.....	57
Şekil 6.6	$i_{S1p}$ - $L_{sa}$ karakteristiği.....	61
Şekil 6.7	(a) Ana anahtarın ZVT aralığında $I_{Lsa}$ - $L_{sa}$ karakteristiği.....	62
Şekil 6.7	(b) Ana anahtarın ZCT aralığında $I_{Lsa}$ - $L_{sa}$ karakteristiği.....	62
Şekil 6.8	(a) Ana anahtarın ZVT aralığında $I_{Lsb}$ - $L_{sa}$ karakteristiği.....	63
Şekil 6.8	(b) Ana anahtarın ZCT aralığında $I_{Lsb}$ - $L_{sa}$ karakteristiği.....	63
Şekil 6.9	Ana anahtarın ZVT aralığı- $L_{sa}$ karakteristiği. ....	64
Şekil 6.10	Ana anahtarın ZCT aralığı- $L_{sa}$ karakteristiği.....	64
Şekil 6.11	Ana anahtarın ZVT aralığında yardımcı anahtarın ZCT aralığı- $L_{sa}$ karakteristiği.....	65
Şekil 6.12	Ana anahtarın ZCT aralığında yardımcı anahtarın ZCT aralığı- $L_{sa}$ karakteristiği.....	65
Şekil 6.13	ZVT ve ZCT aralıklarının $I_{in}$ 'e bağlı değişimi. ....	66
Şekil 7.1	Yeni ZVT-ZCT-PWM yüksek çıkışlı DC-DC dönüştürücünün deneysel devre şeması.....	69
Şekil 7.2	Laboratuvarında gerçekleştirilen uygulama devresi.....	70
Şekil 7.3	Sert anahtarlama ana anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 4 A/kare ve 10µs/kare olarak ölçeklidir. ....	72
Şekil 7.4	Sert anahtarlama ana diyodun gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 4 A/kare ve 10µs/kare olarak ölçeklidir. ....	72
Şekil 7.5	Sert anahtarlama iletime girme esnasında ana anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 4 A/kare olarak ölçeklidir. ....	73
Şekil 7.6	Sert anahtarlama kesime girme esnasında ana anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 4 A/kare olarak ölçeklidir. ....	73
Şekil 7.7	Sert anahtarlama iletime girme esnasında ana diyodun gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 4 A/kare olarak ölçeklidir. ....	74
Şekil 7.8	Sert anahtarlama kesime girme esnasında ana diyodun gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 4 A/kare olarak ölçeklidir. ....	74

Şekil 7.9	Ana ve yardımcı anahtarların kontrol sinyalleri. 5 V/kare ve 1µs/kare olarak ölçeklidir. ....	76
Şekil 7.10	Ana anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve 1µs/kare olarak ölçeklidir. ....	77
Şekil 7.11	İletime girme esnasında ana anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve 0.5µs/kare olarak ölçeklidir. ....	77
Şekil 7.12	Kesime girme esnasında ana anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve 0.5µs/kare olarak ölçeklidir. ....	78
Şekil 7.13	Ana diyodun gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve 1µs/kare olarak ölçeklidir. ....	78
Şekil 7.14	Yardımcı anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve 1µs/kare olarak ölçeklidir. ....	79
Şekil 7.15	ZVT aralığında yardımcı anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve 0.5µs/kare olarak ölçeklidir. ....	79
Şekil 7.16	ZCT aralığında yardımcı anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve 0.5µs/kare olarak ölçeklidir. ....	80
Şekil 7.17	Bastırma kondansatörünün gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve 1 µs/kare olarak ölçeklidir. ....	80
Şekil 7.18	D <sub>3</sub> diyodunun gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve 1 µs/kare olarak ölçeklidir. ....	81
Şekil 7.19	D <sub>4</sub> diyodunun gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve 1 µs/kare olarak ölçeklidir. ....	81
Şekil 7.20	Teklif edilen dönüştürücü ile sert anahtarlama dönüştürücünün verim eğrileri. ....	82



## ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Klasik ve modern bastırma hücrelerinin karşılaştırılması (Bodur vd., 2002). ....	19
Çizelge 3.1	Devrede kullanılan aktif ve pasif yarı iletken elemanların anahtarlama durumları ve maruz kaldıkları maksimum gerilim ve akım değerleri. ....	27
Çizelge 4.1	Devrede kullanılan aktif ve pasif yarı iletken elemanların anahtarlama durumları ve maruz kaldıkları maksimum gerilim ve akım değerleri. ....	34
Çizelge 5.1	Devrede kullanılan aktif ve pasif yarı iletken elemanların anahtarlama durumları ve maruz kaldıkları maksimum gerilim ve akım değerleri. ....	44
Çizelge 7.1	Uygulamada kullanılan yarı iletken elemanların bazı nominal değerleri.....	71

## **ÖNSÖZ**

“Yeni Bir Yumuşak Anahtarlama DC-DC PWM Dönüştürücünün Tasarım, Analiz ve Uygulaması” başlıklı Doktora Tezi çalışmamı, teorik ve pratik olarak tamamlamış bulunmaktayım. Yapmış olduğum bu tezin, daha sonra bu konuda çalışacak olan meslektaşlarıma yararlı olmasını dilerim.

Lisansüstü tez çalışmalarım boyunca büyük bir özveri ile beni daima yönlendiren ve destekleyen, tez danışmanım ve hocam Prof. Dr. Hacı BODUR Bey’e en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Y. Doç. Dr. A. Faruk BAKAN’a ve Güç Elektroniği Laboratuvarında bulunan hocalarım ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Ayrıca, bu uzun çalışma boyunca maddi manevi destekleriyle beni her zaman teşvik eden aileme de şükranlarımı sunuyorum.

## ÖZET

Darbe Genişlik Modülasyonlu (PWM) DC-DC dönüştürücüler, yüksek güç yoğunluğu, hızlı geçiş cevabı ve kontrol kolaylığı nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Daha yüksek güç yoğunluğu ve daha hızlı geçiş cevabı, ancak anahtarlama frekansının artırılmasıyla elde edilebilmektedir. Fakat, anahtarlama frekansı arttığında, anahtarlama kayıpları da artmaktadır. Frekansın artırılması, ancak sert anahtarlama (HS) yerine yumuşak anahtarlama (SS) tekniklerinin kullanılması ile mümkün olmaktadır.

Genel olarak yumuşak anahtarlama teknikleri, sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS), sıfır akımda anahtarlama (ZCS), sıfır gerilimde geçiş (ZVT) ve sıfır akımda geçiş (ZCT) şeklinde sıralanabilir. Rezonanslı devrelerde, anahtarlama anlarında gerilim veya akımın sıfır olması nedeniyle, doğal ve mükemmel olarak SS sağlanır. Buna karşılık, bu devrelerde, güç yoğunluğu düşüktür, genellikle frekans değişkendir ve PWM yeteneği yoktur.

Rezonans ve PWM tekniklerinin avantajlarının birleştirilmesi düşüncesinden yola çıkılarak, sadece anahtarlama işlemleri esnasında bir kısa süreli veya kısmi rezonans kullanılarak, mükemmel bir SS ve PWM yeteneğine sahip olan ZVT ve ZCT teknikleri geliştirilmiştir. Prensipten olarak, her iki teknikte de bir yardımcı anahtar ve bir kısa süreli veya kısmi rezonans devresi kullanılır. ZVT tekniğinde ana anahtarın ilettime girme işlemindeki ve ZCT tekniğinde ana anahtarın kesime girme işlemindeki anahtarlama kayıplarının bastırılması veya sıfırlanması hedeflenir. Son yıllarda ZVT ve ZCT tekniklerinin birleştirilmesi konusunda çalışmalar yapılmaktadır.

Bu tezde, PWM dönüştürücülerde güç yoğunluğu ile verimin artırılması ve EMI gürültünün azaltılması için yeni bir aktif bastırma hücresi geliştirilmiştir. Geliştirilen bastırma hücresi DC-DC dönüştürücüdeki ana anahtarın sıfır gerilim geçişi (ZVT) ile ilettime ve sıfır akım geçişi (ZCT) ile kesime girmesini birlikte sağlamaktadır. Bu bastırma hücresinin kullanıldığı dönüştürücü, geniş bir şebeke ve yük gerilimi aralığında ve yüksek frekanslarda yumuşak anahtarlama ile çalışabilmektedir. Ayrıca, bu dönüştürücüde bütün yarı iletken elemanlar yumuşak anahtarlama ile çalışır. Ana elemanlarda ilave bir gerilim stresi yoktur ve yardımcı elemanların stresleri de düşük seviyelerdedir. Yeni dönüştürücünün yapısı basit, fiyatı düşük ve kontrolü kolaydır.

Geliştirilen bastırma hücresinin kullanıldığı yeni ZVT-ZCT-PWM yüksek çıkışlı DC-DC dönüştürücü devresinin çalışma prensibi ve etraflı bir kararlı durum analizi sunulmuştur. Sunulan teorik analiz, 100 kHz ve 500 W'lık yüksek çıkışlı bir prototip ile tam olarak doğrulanmıştır. Ayrıca nominal çıkış gücünde dönüştürücü veriminin yaklaşık olarak % 98.3'e ulaştığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yumuşak anahtarlama, aktif bastırma hücresi, sıfır gerilimde anahtarlama, sıfır akımda anahtarlama, sıfır gerilimde geçiş, sıfır akımda geçiş.

## ABSTRACT

Pulse width modulated (PWM) DC–DC converters have been widely used in industry due to their high power density, fast transient response and ease of control. Higher power density and faster transient response can be achieved only by increasing switching frequency. But switching losses increase with switching frequency. For this reason, the switching frequency can be increased by using soft switching (SS) techniques instead of hard switching (HS).

Generally SS techniques can be classified as zero voltage switching (ZVS), zero current switching (ZCS), zero voltage transition (ZVT) and zero current transition (ZCT) techniques. In resonant circuits SS is provided naturally and perfectly because voltage or current is zero at switching intervals. However in these circuits power density is low, generally frequency is not constant and there is no PWM capability.

Combining the advantages of resonance and PWM techniques, ZVT and ZCT techniques, that have perfect SS and PWM capabilities, were developed by using a short time or partial resonance only during the switching processes. In principle, an auxiliary switch and a short time or partial resonance are used in both techniques. It is aimed to snub or zero the switching losses of the main switch during the turn on and turn off processes with the ZVT and ZCT techniques respectively. It is aimed to snub or zero the switching losses of the main switch, at the turn on process with ZVT technique, and at the turn off process with ZCT technique. In recent years some studies have been realized on combining the ZVT and ZCT techniques.

In this thesis, a new snubber cell is developed in order to increase the power density and the efficiency in PWM converters and to decrease the EMI noise. The developed snubber cell provides main switch both to turn on with zero voltage transition (ZVT) and to turn off with zero current transition (ZCT). The converter incorporating this snubber cell can work in a wide range of line and load voltages and can operate with soft switching at high frequencies. Also, in this converter all semiconductor devices operate with soft switching. There is no additional voltage stress in main components and the stresses of the auxiliary components are low. Also, the new converter has a simple structure, low cost and ease of control.

The operation principle and detailed steady state analysis of a new ZVT-ZCT-PWM boost converter circuit, in which the developed snubber cell is used, is presented. The presented theoretical analysis is verified exactly by a prototype of 100 kHz and 500 W converter. Also, the overall efficiency of the new converter reached a value of % 98.3 at nominal output power.

**Keywords:** Soft switching, active snubber cells, zero voltage switching, zero current switching, zero voltage transition, zero current transition.

## 1. GİRİŞ

Yüksek güç yoğunluğu, hızlı geçiş cevabı ve kontrol kolaylığı nedeniyle, darbe genişlik modülasyonlu (PWM) DC-DC dönüştürücüler, endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. PWM DC-DC dönüştürücülerde daha yüksek güç yoğunluğu ve daha hızlı geçiş cevabı, anahtarlama frekansı yükseltilerek elde edilebilir. Ancak, anahtarlama frekansı arttıkça, anahtarlama kayıpları ve elektromanyetik girişim (EMI) gürültüsü de artar. Bu sorunlar ancak sert anahtarlama (HS) yerine bastırma hücreleriyle elde edilen yumuşak anahtarlama (SS) tekniklerinin kullanılması ile sağlanabilmektedir (Hua vd., 1994; Bodur ve Bakan, 2002).

Yumuşak anahtarlama, stres azaltma, bastırma, gerilim bastırma, yük hattı şekillendirme ve stres azaltma şebekeleri gibi terimlerle yayınlarda fark edilir. Yumuşak anahtarlama, anahtarlama esnasında, elemanın maruz kaldığı akım ve gerilim değerleri ile akım ve gerilim yükselme hızlarının bastırılması, akım ve gerilim değişimlerinin şekillendirilmesi, anahtarlama kayıpları ile EMI gürültünün azaltılması ve anahtarlama enerjisinin yüke veya kaynağa transfer edilmesi fonksiyonlarını kapsar. Literatürde, RC/RCD, kutuplu/kutupsuz, rezonanslı/rezonanssız ve aktif/pasif gibi çok değişik türde sunulmuş bastırma hücresi mevcuttur (Ferraro, 1982; Bodur ve Bakan, 2002).

Temel olarak anahtarlama kayıpları, anahtarlama esnasındaki akım ve gerilimin üst üste binme enerji kaybı, diyodun ters toparlanma enerji kaybı ile parazitik kondansatörün deşarj enerji kaybından oluşur. Genel olarak SS teknikleri, sıfır akımda anahtarlama (ZCS), sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS), sıfır akımda geçiş (ZCT) ve sıfır gerilimde geçiş (ZVT) ile anahtarlama şeklinde sıralanabilir (Smith vd., 1999; Bodur ve Bakan, 2002).

Dönüştürücülerde anahtarlama elemanı olarak MOSFET'ler kullanıldığında, iletme girme esnasında parazitik kondansatörünün deşarjından dolayı meydana gelen kayıplar anahtarlama kayıplarının büyük bir kısmını teşkil etmektedir. MOSFET'ler yüksek güçlü dönüştürücülerde kullanıldığında, iletim durumundaki iç direncinden dolayı iletim güç kayıpları yüksektir (Hua vd., 1994; Stein vd., 2000).

Son zamanlarda, yüksek güçlü endüstriyel uygulamalarda, izole kapılı bipolar transistörler (IGBT) anahtarlama elemanları olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. IGBT'nin yüksek anahtarlama gücü ve düşük iletim kaybına sahip olmasına karşılık, kesime girme esnasında kuyruk akımından dolayı özellikle kesime girme anahtarlama kaybı oldukça yüksektir (Hua vd., 1994; Mao vd., 1997).

Rezonanslı dönüştürücülerde komütasyonların sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS) veya sıfır akımda anahtarlama (ZCS) ile gerçekleştirilmesinden dolayı anahtarlama kayıpları önemli ölçüde azalır. Fakat, rezonanslı dönüştürücülerde, aşırı gerilim ve akım stresleri oluşur, normal PWM dönüştürücülere göre güç yoğunluğu daha düşük ve kontrol daha zordur (Mao vd., 1997; Smith vd., 1997; Tseng vd., 1998; Grigore vd., 1998; Menegaz vd., 1999; Bodur ve Bakan, 2002).

Son yıllarda, rezonanslı ve normal PWM tekniklerinin istenen özelliklerini birleştirmek için, normal PWM dönüştürücülere rezonanslı aktif bastırma hücreleri eklenerek, çok sayıda sıfır gerilim geçişli (ZVT) ve sıfır akım geçişli (ZCT) PWM dönüştürücü sunulmuştur. Bu dönüştürücülerde, iletme ve kesime girme işlemleri, bir rezonans tarafından sağlanan çok kısa bir ZVT veya ZCT süresinde ZVS ve/veya ZCS altında gerçekleşir. Böylece, rezonanslar çok kısa zaman aralıklarında oluştuğu için, dönüştürücü çalışma periyodunun büyük bir kısmında normal bir PWM dönüştürücü olarak davranır. Fakat, bastırma elemanlarının çalışma özellikleri sebebiyle, PWM çalışmanın iletim ve kesim durumları minimum bir süreye sahiptir (Hua vd., 1994; Grigore vd., 1998; Bodur ve Bakan, 2002).

Temel ZVT-PWM dönüştürücüde, ana anahtar, paralel rezonanslı bir bastırma hücresi yardımıyla ZVT ile mükemmel olarak iletme girer. Ana diyot ZVS ile iletim ve kesime girer. Yük akımı, ana diyodun ters toparlanma akımı ve ana anahtarın parazitik kondansatörünü kapsayan rezonans kondansatörünün enerjisi, bir yardımcı anahtar vasıtasıyla rezonans endüktansına aktarılır. Buna karşılık, ana anahtar sadece yaklaşık ZVS altında kesime ve yardımcı anahtar yaklaşık ZCS ile iletme girer. Yardımcı anahtar sert anahtarlama ile kesime girer. Ayrıca, devrenin çalışması büyük ölçüde hat ve yük şartlarına bağlıdır. (Hua vd., 1994; Bodur ve Bakan, 2002).

Moschopoulos vd. (1995) tarafından geliştirilen ZVT-PWM dönüştürücüde, temel dönüştürücüdeki bastırma hücresine ilave olarak bir rezonans kondansatörü eklenerek yardımcı anahtarın yumuşak anahtarlama ile kesime girmesi sağlanmıştır. Fakat ana anahtar ilave bir akım stresine ve yardımcı anahtar da ek gerilim stresine maruz kalır. Ana anahtarın kesime girmesi yaklaşık sıfır gerilimde olmaktadır ve yük akımına bağlıdır. Sirkülasyon enerjisi yüksektir.

Moschopoulos ve Jain (1996) yaptıkları çalışmada (1995) yılında önerilen bastırma hücresine ilave olarak bir transformatör kullanarak sirkülasyon enerjisini azaltmışlardır. Fakat bu devrede de ana anahtarda ilave bir akım stresi ve yardımcı anahtar da ek gerilim stresi

mevcuttur.

Tseng ve Chen (1998), Moschopoulos vd. (1995) tarafından geliştirilen bastırma hücreğine ilave olarak bir diyot kullanılmış böylece rezonans kondansatörünün deşarj olması sağlanarak yardımcı anahtarın ek gerilim stresine maruz kalması önlenmiştir.

Kim vd. (2000) tarafından yapılan çalışmada, temel ZVT'de kullanılan bastırma hücreğine paralel olarak iki kondansatör ve bir diyot ilave edilmiş, böylece yardımcı anahtarın kesime girme kayıplarının azaltılması ve devre veriminin yükseltilmesi sağlanmıştır.

Jain vd. (2001) yaptıkları çalışmada yeni bir ZVT bastırma hücreği önermişlerdir. Bu hücre ile yardımcı anahtarın maruz kaldığı ek gerilim stresi ve sirkülasyon enerjisi azaltılmıştır fakat ana anahtarda ilave bir akım stresi mevcuttur.

Bodur ve Bakan (2002) tarafından önerilen ZVT-PWM dönüştürücü temel ZVT dönüştürücüdeki problemlerin çoğunu çözmektedir. Yardımcı anahtar yaklaşık olarak sıfır gerilimde kesime girerken ana anahtar üzerinde ilave bir akım stresi oluşmamaktadır. Ana anahtar uçlarında paralel bir kondansatör kullanılmadığından sirkülasyon enerjisi düşüktür. Ana anahtar yaklaşık sıfır gerilimde kesime girer ve devrenin çalışması yük akımının değişmesinden etkilenmez.

Martins vd. (2002)'nin önerdikleri bastırma hücreği temel ZVT devresindeki dezavantajların birçoğunu ortadan kaldırmıştır. Yardımcı anahtarın yumuşak bir şekilde kesime girmesi sağlanırken ana anahtarda ilave bir akım stresi meydana gelmez. Ayrıca yardımcı anahtarda ilave bir gerilim stresi de yoktur. Fakat ana anahtarın kesime girmesi yaklaşık olarak sıfır gerilimde olmaktadır ancak yük akımına bağlıdır.

Huang ve Moschopoulos (2006)'un sundukları bastırma hücreği ana elemanın ZVT ile ilettime girmesini sağlar. Bastırma hücreğinde kullanılan yardımcı anahtarın ZCS ile ilettime ve ZVS ile kesime girmesi sağlanırken, ana eleman üzerinde hiçbir ilave akım stresi oluşmamaktadır. Ana elemanın kesime girmesi yaklaşık ZVS ile olmaktadır ancak yük akımına bağlıdır. Ayrıca, devredeki geçici olayların süresi fazladır.

Wang (2006) tarafından önerilen ZVS-PWM bastırma hücreği ile ana eleman üzerinde hiçbir akım stresi oluşmadan yardımcı anahtarın ZCS ile ilettime ve kesime girmesi sağlanmıştır. Devredeki anahtarlar üzerinde ek bir gerilim stresi yoktur. Ana elemanın kesime girmesi yaklaşık sıfır gerilimde sağlanmaktadır.

Temel ZCT-PWM dönüştürücüde, ana anahtar, seri rezonanslı bir bastırma hücresi yardımıyla ZCS ve ZVS altında mükemmel olarak kesime girer. Yardımcı anahtar yaklaşık ZCS ile ilettime girer. Devrenin çalışması hat ve yük şartlarına çok az bağlıdır. Buna karşılık, eşzamanlı ve sert anahtarlama ile ana anahtar ilettime ve ana diyot kesime girer, böylece aynı zamanda bir kısa devre oluşur. Büyük değerlerde kayıplara ve EMI gürültüye neden olan bu kısa devrenin önlenmesi, oldukça zordur. Ayrıca, yardımcı anahtar sert anahtarlama ile kesime girer ve anahtarların parazitik kondansatörleri anahtarlar üzerinden boşalır (Hua vd., 1994; Bodur ve Bakan, 2002).

Mao vd. (1997) tarafından yapılan çalışmada yeni bir bastırma hücresi geliştirilerek sunulmuştur. Geliştirilen devrede ana anahtarın ilettime girmesi ve ana diyodun kesime girmesi yaklaşık sıfır akımda sağlanmıştır. Ana elemandaki akım stresi temel ZCT dönüştürücüdeki gibi yüksektir ayrıca ana diyot üzerinde de ilave bir akım stresi vardır. Sirkülasyon enerjisi fazladır. Ana anahtarın parazitik kondansatörü anahtar ilettime girdiğinde bu eleman üzerinden deşarj olur.

Fuentes ve Hey (1999)'in yaptıkları çalışmada önerdikleri bastırma hücresi yarı iletken elemanların sıfır akımda ilettime ve kesime girmesi sağlar. Ana elemandaki akım stresi azaltılmış olmasına rağmen ana diyot çıkış geriliminin iki katı kadar bir gerilime maruz kalmaktadır. Ayrıca ana anahtarın iletim de kalma süresinin minimum bir değeri vardır ve bu sürenin altına inilemez.

Lee vd. (2003) tarafından önerilen ZCT PWM DC-DC dönüştürücüde, ana elemanın akım stresini artırmadan ZCT ile kesime girmesi sağlanır Aynı zamanda ana elemanın ilettime ve ana diyodun kesime girmesi yaklaşık sıfır akımda gerçekleşir. Devrede kullanılan yardımcı anahtarın ilettime ve kesime girmesi de yumuşak anahtarlama ile gerçekleşir. Ana diyot çıkış geriliminin iki katı bir gerilime maruz kalır ve oluşan çalışma aralıklarından biri yük akımına bağlıdır.

Das ve Moschopoulos (2007)'in yaptıkları çalışmada ana anahtarın yaklaşık sıfır akımda ilettime ve ZCT ile kesime girmesi ana anahtarın akım stresini artırmadan sağlanmıştır. Devrede bir transformatör kullanılarak sirkülasyon enerjisi azaltılmıştır. Burada ana diyot çıkış geriliminin iki katında daha az bir gerilime maruz kalır ve oluşan çalışma aralıklarından biri yük akımına bağlıdır.

Geliştirilmiş veya yeni ZVT ve ZCT dönüştürücüler ile temel ZVT ve ZCT dönüştürücülerindeki problemler farklı yöntemlerle çözülmeye çalışılmıştır. Bu yöntemlerde



hala bazı problemler ve anahtarlama kayıpları mevcuttur. Bu problemleri yok etmek için ZVT ve ZCT tekniklerinin birleştirilmesiyle elde edilen ZVT-ZCT-PWM DC-DC dönüştürücüler önerilmiştir (Stein vd., 2000, Bodur ve Bakan, 2004, Bakan vd., 2005). Bu dönüştürücülerde ana anahtarın iletme ve kesime girme işlemleri tam olarak sıfır gerilimde ve sıfır akımda gerçekleştirilmektedir. Ayrıca ilave olarak kullanılan yardımcı anahtarın da yumuşak anahtarlama ile iletme girmesi ve kesime girmesi sağlanmıştır.

Stein vd. (2000) tarafından PWM dönüştürücüler için sıfır akım ve sıfır gerilim geçişli (ZCZVT) komütasyon hücresi sunulmuştur. Bu hücre, ana anahtar için hem iletme girme hem de kesime girmede ZCS ve ZVS'yi birlikte sağlarken, ana diyot için de ZVS sağlar. Fakat devrenin çalışabilmesi için, giriş gerilimi çıkış geriliminin yarısından daha küçük olmalıdır. Ana anahtar bir ilave akım stresine sahiptir ve sirkülasyon enerjisi yüksektir. Ayrıca çalışma aralıklarının sayısı çok olduğu gibi bu aralıkların çoğu uzun sürelidir. Yardımcı anahtarın kontrol ucu toprağa bağlı olmadığından dolayı kontrol sinyalinin izole edilerek elemana verilmesi gereklidir.

Bodur ve Bakan (2004) tarafından önerilen bastırma hücresi, dönüştürücüdeki ana anahtarın sıfır gerilim geçişi (ZVT) ile iletme ve sıfır akım geçişi (ZCT) ile kesime girmesini sağlar. Ana eleman ve ana diyotta hiçbir ilave gerilim ve akım stresi yoktur. Devrede kullanılan endüktans manyetik kuplajlıdır. Manyetik kuplajın çok iyi yapılmaması durumunda kaçak endüktansın değeri artar ve ilave kayıplar meydana gelir.

Bakan vd. (2005) tarafından önerilen bastırma hücresinde kullanılan eleman sayısı diğer ZVZCT bastırma hücrelerine göre daha az olmasına karşın yardımcı anahtarın kesime girmesi yaklaşık sıfır akımda olmaktadır. Ayrıca ana anahtarın maruz kaldığı akım stresi yüksektir.

Bölüm 2'de önce sert ve yumuşak anahtarlama ile bastırma hücresi kavramları ele alınmış, sonra yumuşak anahtarlama teknikleri incelenmiş ve ayrıca bastırma hücrelerinin sınıflandırılması ile karşılaştırılması sunulmuştur.

Bölüm 3'te temel ZVT devresi, Bölüm 4'te temel ZCT devresi ve Bölüm 5'te de ZVT ve ZCT tekniklerinin birleştirildiği ZCZVT'li bir DC-DC dönüştürücü incelenmiştir.

Bölüm 6'da geliştirilen bastırma hücresinin kullanıldığı yeni ZVT-ZCT-PWM yüksek çıkışlı DC-DC dönüştürücü devresinin çalışma prensibi ve etraflı bir kararlı durum analizi sunulmuştur.

Bölüm 7'de önerilen ZVT-ZCT-PWM yüksek çıkışlı DC-DC dönüştürücünün laboratuvarında

geçekleştirilen uygulama devresi ile bu devreden alınan sonuçlar verilmiştir. Sunulan teorik analiz, giriş gerilimi 200 V, anahtarlama frekansı 100 kHz ve gücü 500 W olan yüksek çıkışlı bir prototip ile doğrulanmıştır.

Son bölüm olan 8. bölümde ise yapılan çalışmalar özetlenmiş ve gelecekte bu konuda çalışmak isteyenlere öneriler sunulmuştur.

## 2. YUMUŞAK ANAHTARLAMA ve BASTIRMA HÜCRESİ KAVRAMI

### 2.1 Giriş

Bu bölümde, önce sert ve yumuşak anahtarlama ile bastırma hücresi kavramları ele alınmış, sonra yumuşak anahtarlama teknikleri incelenmiş ve ayrıca bastırma hücrelerinin bir sınıflaması ile bir karşılaştırması sunulmuştur.

### 2.2 Anahtarlama Kavramı

Anahtarlama kavramı, örnek olarak seçilen omik yüklü bir DC kıyıcı ile düşük çıkışlı bir DC-DC dönüştürücü devresinin periyodik çalışmaları üzerinde incelenmiştir. Yarı iletken anahtarlama güç elemanı olarak bir bipolar transistör (BJT) kullanılmıştır (Bodur vd., 2002).

#### 2.2.1 Omik Yüklü bir DC Kıyıcı

Şekil 2.1(a) ve (b)'de anahtarlama elemanı olarak BJT'nin kullanıldığı omik yüklü bir DC kıyıcının devre şeması ve temel dalga şekilleri görülmektedir. Şekil 2.1(b)'den görüldüğü gibi, bir çalışma periyodu içerisinde BJT, iletim ve kesim ile anahtarlama olmak üzere 3 temel durumda bulunmaktadır. Anahtarlama durumu ise iletim ve kesime girme işlemlerinden oluşmaktadır.

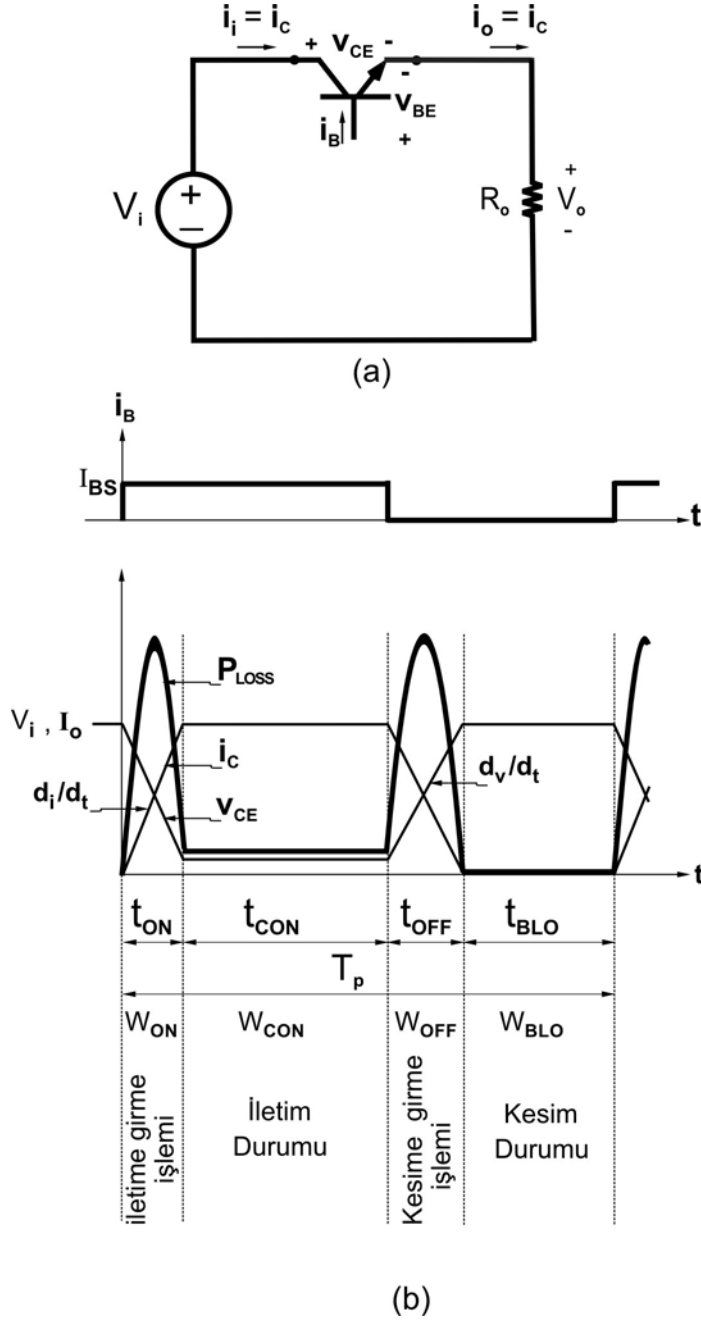
**1. İletim Durumu:** Güç anahtarının minimum gerilim düşümü altında maksimum akım geçirdiği ve doyumda çalışma denilen durumdur. Bu durum,

$$\left. \begin{aligned} V_{CE} &= V_{CON} = V_{CEmin} = V_{CEsat} \\ i_C &= i_{CON} = I_{CS} = I_o = (V_i - V_{CEsat}) / R_o \\ W_{CON} &= \int_0^{t_{CON}} V_{CON} i_{CON} dt \end{aligned} \right\} \text{İletim Durumu} \quad (2.1)$$

şeklinde tanımlanır. Bazı durumlarda,

$$\left. \begin{aligned} V_{CEsat} &\cong 0 \\ I_o &\cong V_i / R_o \end{aligned} \right\} \text{Kabuller} \quad (2.2)$$

kabulleri yapılır. Burada,  $V_{CEsat}$  transistörün doyum gerilimi ve  $I_{CS}$  doyum akımıdır.



Şekil 2.1 (a) Omik yüklü bir DC kıyıcının devre şeması ve (b) temel dalga şekilleri (Bodur vd., 2002).

**2. Kesim Durumu:** Güç anahtarının akım geçirmeden kaynak gerilimini tutması durumudur. Bu durumda, elemandan çok küçük değerinde bir kaçak veya sızıntı akım geçer. Bu durum,

$$\left. \begin{array}{l} v_{CE} = v_{BLO} = V_i \\ i_C = i_{BLO} \cong 0 \\ W_{BLO} \cong 0 \end{array} \right\} \text{ Kesim Durumu} \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilir.

**3. Anahtarlama Durumu:** Güç anahtarının iletim ve kesime girme işlemleridir.

**a) İletime Girme İşlemi:** Giriş sinyali uygulandığında, eşzamanlı ve lineer olarak, güç anahtarının uçlarındaki gerilimin minimum değerine düşmesi ve anahtardan geçen akımın maksimum değerine yükselmesi işlemidir. Bu durum,

$$\left. \begin{aligned} v_{CE} = v_{ON} &\cong V_i - V_i \frac{t}{t_{ON}} \\ i_C = i_{ON} &= I_o \frac{t}{t_{ON}} \\ W_{ON} &= \int_0^{t_{ON}} v_{ON} i_{ON} dt \end{aligned} \right\} \text{İletime Girme İşlemi} \quad (2.4)$$

şeklinde tanımlanır. Burada,  $t_{ON}$  anahtarın iletime girme süresidir.

**b) Kesime Girme İşlemi:** Giriş sinyali kesildiğinde, yine eşzamanlı ve lineer olarak, anahtarın içerisinden geçen akımın sıfıra düşmesi ve anahtarın uçlarındaki gerilimin kaynak gerilimine yükselmesi işlemidir. Bu durum ise,

$$\left. \begin{aligned} v_{CE} = v_{OFF} &\cong V_i \frac{t}{t_{OFF}} \\ i_C = i_{OFF} &= I_o - I_o \frac{t}{t_{OFF}} \\ W_{OFF} &= \int_0^{t_{OFF}} v_{OFF} i_{OFF} dt \end{aligned} \right\} \text{Kesime Girme İşlemi} \quad (2.5)$$

olarak tanımlanır. Burada,  $t_{OFF}$  anahtarın kesime girme süresidir. Yukarıdaki bağıntılara göre, güç anahtarının anahtarlama ve toplam enerji kayıpları,

$$\left. \begin{aligned} W_{SW} &= W_{ON} + W_{OFF} \\ W_{TOT} &= W_{CON} + W_{SW} \end{aligned} \right\} \text{Enerji Kayıpları} \quad (2.6)$$

olur. Enerji kayıplarının darbe frekansı ile çarpılmasıyla, genel olarak güç kayıpları için,

$$\left. \begin{aligned} P_{CON} &= f_p W_{CON} \\ P_{SW} &= f_p W_{ON} + f_p W_{OFF} = P_{ON} + P_{OFF} \\ P_{TOT} &= f_p W_{CON} + f_p W_{SW} = P_{CON} + P_{SW} \end{aligned} \right\} \text{Güç Kayıpları} \quad (2.7)$$

yazılabilir. Burada,  $f_p$  devrenin anahtarlama veya çalışma ya da darbe frekansıdır. Anahtarlama periyodu  $T_p$  olduğuna göre,  $f_p=1/T_p$  olur. İletim durumunda, transistörün gerilim

düşümü  $v_{CON}$  ve geçirdiği akım  $i_{CON}$  sabit kabul edilir ve  $t_{CON}=\lambda T_P$  alınır, toplam güç kaybı,

$$P_{TOT} = \lambda V_{CON} I_{CON} + f_p W_{SW} = P_{CON} + P_{SW} \quad (2.8)$$

şeklinde yazılabilir. Burada,  $\lambda$  bağıl iletim süresi veya iletim/kesim oranı olarak bilinir.(2.8) bağıntısından görüldüğü gibi, iletim güç kaybı bağıl iletim süresi  $\lambda$  ve anahtarlama güç kaybı anahtarlama frekansı  $f_p$  ile doğrudan orantılıdır.

Transistör için,  $t_{CON}/T_P = \lambda$ ,  $t_{ON} \cong t_r$ ,  $t_{OFF} \cong t_f$ ,  $v_{CON} = V_{CEsat}$  ve  $i_{CON} = I_o$  olarak alınır,

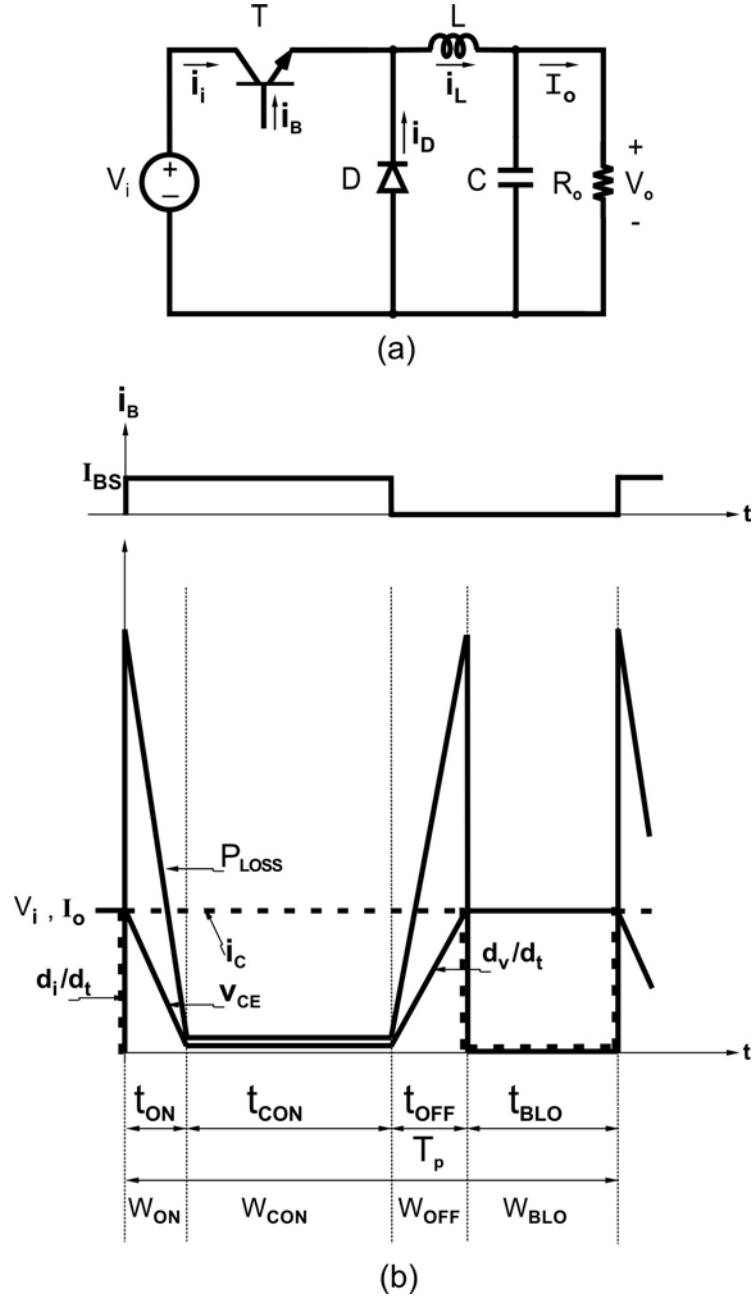
$$\left. \begin{aligned} W_{CON} &= V_{CEsat} I_o \lambda T_P \\ W_{ON} &= \frac{V_i I_o}{6} t_r \\ W_{OFF} &= \frac{V_i I_o}{6} t_f \end{aligned} \right\} \text{BJT Enerji Kayıpları} \quad (2.9)$$

sonuçlarına erişilir. Burada,  $t_r$  ve  $t_f$ , transistör akımının sırasıyla yükselme ve düşme süreleridir. Genellikle, iletim ve kesime girme sürelerinin bu akım yükselme ve düşme sürelerine eşit olduğu kabul edilir. Ayrıca, anahtarlama işlemleri esnasında, akım ve gerilim değişimlerinin lineer olduğu kabul edilir.

### 2.2.2 Düşük Çıkışlı bir DC-DC Dönüştürücü

Düşük çıkışlı bir DC-DC dönüştürücünün devre şeması ve temel dalga şekilleri Şekil 2.2(a) ve (b)'de verilmiştir. Bir çalışma periyodu içerisinde BJT, yine iletim ve kesim ile anahtarlama durumlarında olmaktadır. Şekil 2.2(b)'den de görüldüğü gibi, bu devrenin iletim ve kesim durumları omik yüklü DC kıyıcıdakiler ile aynıdır, fakat anahtarlama işlemleri oldukça farklıdır. Aslında bu dönüştürücü, yeterli büyüklükte bir endüktansa sahip olan omik-endüktif yüklü bir DC kıyıcı örneğidir.

DC-DC dönüştürücüler, anahtarlanan endüktansın enerji aktarımı prensibine göre çalışan devrelerdir. Endüktans değerinin yeterince büyük olduğu ve endüktans akımının sabit kaldığı kabul edilebilir. Transistör iletimde iken, diyot kesimdedir ve gerilim kaynağı hem endüktansı hem de yükü besler. Transistör kesimde iken, diyot iletimdedir ve endüktansta biriken enerji bu diyot üzerinden yüke aktarılır.



Şekil 2.2 Düşük çıkışlı bir DC-DC dönüştürücünün (a) devre şeması, (b) temel dalga şekilleri (Bodur vd., 2002).

Bu dönüştürücüye ait ve özellikle omik yüklü DC kırıyıcıdan farklı olan bağlantılar,

$$\left. \begin{aligned} v_{CE} = v_{ON} &\cong V_i - V_i \frac{t}{t_{ON}} \\ i_C = i_{ON} &= I_o \end{aligned} \right\} \text{İletime Girme İşlemi} \quad (2.10)$$

$$\left. \begin{aligned} v_{CE} = v_{OFF} &\cong V_i \frac{t}{t_{OFF}} \\ i_C = i_{OFF} &= I_o \end{aligned} \right\} \text{Kesime Girme İşlemi} \quad (2.11)$$

$$\left. \begin{aligned} W_{CON} &= V_{CEsat} I_o \lambda T_P \\ W_{ON} &= \frac{V_i I_o}{2} t_r \\ W_{OFF} &= \frac{V_i I_o}{2} t_f \end{aligned} \right\} \text{BJT Enerji Kayıpları} \quad (2.12)$$

şeklinde özetlenebilir.

Burada hemen şunu vurgulamak gerekir ki, DC-DC dönüştürücüde, anahtarlama işlemleri sabit kabul edilen çıkış akımı altında gerçekleşir ve anahtarlama kayıpları omik yüklü DC kırıyıcıdaki kayıpların 3 katıdır.

Bu devrede, güç diyodunun ideal olduğu kabul edilmiştir. Gerçekte, diyot iletimde iken transistör sürüldüğünde, diyodun ters toparlanma veya sönme süresi boyunca iki eleman üzerinden tam bir kısa devre oluşur ve sonunda diyot söner. Burada, güç diyodunda bir ters toparlanma kaybı oluşur ve geçen kısa devre akımı ilave salınım ve kayıplara neden olur.

Ayrıca, güç anahtarının ana uçları arasında bir parazitik kondansatör mevcuttur. Güç anahtarının iletme girmesi esnasında, bu parazitik kondansatörün anahtar üzerinden deşarj olması da ilave bir kayba neden olur.

Genellikle, yarı iletken güç anahtarlarında, kesime girme süresi iletme girme süresinden daha büyüktür ve böylece kesime girmedeki anahtarlama kaybı iletme girmedeki anahtarlama kaybından çok daha yüksektir.

### 2.3 Anahtarlama ve Dönüştürme Özellikleri

Omik yüklü bir DC kırıyıcının endüstriyel olarak pek anlamı yoktur. Çünkü, DC kırıyıcı olarak bilinen devreler endüstride yaygın olarak DC motor kontrolünde kullanılır ve bu motorlar da omik-endüktif yüklerdir. Yine endüstride yaygın bir şekilde kullanılan PWM kontrollü DC-DC dönüştürücüler de omik-endüktif özellikli devrelerdir (Bodur vd., 2002).

Anahtarlama, temel olarak bir güç elemanın iletim ve kesime girme işlemleridir. Anahtarlama işlemlerinde, güç anahtarının akım ve geriliminin üstüste binmesiyle oluşan anahtarlama kayıpları yanında, güç diyodunun ters toparlanma kaybı ve güç anahtarının parazitik



kondansatörünün deşarj kaybı da oluşmaktadır. Bu anahtarlama kayıplarının hepsi darbe frekansı ile doğru orantılıdır. Bu kayıplar arttıkça, kullanılan güç elemanlarının nominal değerleri ile soğutucu ve soğutma sisteminin boyutları da artar. Sonuç olarak, devrenin hacmi ile maliyeti artar ve güç yoğunluğu düşer.

Anahtarlama işlemleri esnasında, büyük değerli olan akım ve gerilim yükselme hızları, yüksek değerli EMI gürültülere neden olur. Bu gürültüler ise, kontrol ve haberleşme sinyallerini bozar. Akım ve gerilimin yükseleme hızları, aslında anahtarlama kayıplarının da temel nedenidir.

DC-DC dönüştürücülerde, iletim ve kesim durumlarındaki akım ve gerilim değişimlerinde dalgalanmalar olmadığından, sirkülasyon enerjisi veya reaktif enerjinin de olmadığı söylenebilir. Bu durum ise, anahtarlama işlemleri dikkate alınmadığında, bu devredeki güç yoğunluğunun çok yüksek olduğunu gösterir. Ayrıca, anahtarlama frekansı yükseldikçe, endükatans ile kapasitans değerleri orantılı olarak düşer ve güç yoğunluğu daha da artar. Ancak, frekans yükseldiğinde, anahtarlama enerjisi kayıpları ve EMI gürültü de artmaktadır. Bu nedenle, PWM DC-DC dönüştürücülerin gelişimi, anahtarlama problemlerinin çözümüne dayalıdır.

#### **2.4 Yumuşak Anahtarlama ve Bastırma Hücresi Kavramı**

Yukarıda, bir DC kıyıcı ve bir DC-DC dönüştürücü örnek alınarak, anahtarlamanın kavramı ve özellikleri etrafı olarak incelenmiştir. Bu örneklerden görüldüğü gibi, ek bir düzen kullanılmadan doğal olarak gerçekleşen anahtarlamalara sert anahtarlama (HS) denilmektedir. Sert anahtarlama anahtarlama problemlerinin çözülmesi arzusu yumuşak anahtarlama (SS) kavramını ortaya çıkarmıştır (Bodur vd., 2002).

Yumuşak anahtarlama, temel olarak, anahtarlama kayıpları ve EMI gürültünün özel düzenlerle yok edilmesi veya en aza indirilmesi şeklinde tanımlanır. Yumuşak anahtarlama amacıyla geliştirilen ve dönüştürücülerin temel bir parçası olmayan ilave düzen ve devrelere ise bastırma hücreleri denilmektedir. Yayınlarda bastırma hücreleri, yumuşak anahtarlama, stres azaltma, bastırma, yük hattını şekillendirme gibi terimlerle fark edilir.

Bastırma hücreleri, dönüştürücünün ana anahtar ve ana diyodu üzerinde ilave akım ve gerilim streslerinin veya ek kayıpların oluşmasına neden olabilir. Bu ek kayıplar yok edilmeli veya en düşük seviyelerde tutulmalıdır. Ayrıca, bu hücrelerin çalışması güç anahtarının iletim ve kesime girme sürelerinin dışına taşınabilir. Bu taşmalar minimum seviyelerde kalmalı,

böylece bastırma hücresi PWM kontroluna mani olmamalı ve dönüştürücü değişken veya hafif yüklerde de çalışabilmelidir. İlave olarak, bastırma hücreleri dönüştürücünün karmaşıklık ve fiyatını arttırabilir. Bu artışlar da düşük seviyelerde kalmalıdır.

Yumuşak anahtarlama veya bastırma hücrelerinde nihai amacın devrenin güç yoğunluğunun arttırılması olduğu daima göz önünde tutulmalıdır. Bir bastırma hücresinin seçilme kararı, bu hücrenin sağladığı bütün yumuşak anahtarlama yararları ile bu hücrenin neden olduğu ek külfetler iyice karşılaştırılarak verilmelidir.

Yumuşak anahtarlama istenen fonksiyonlar, genel olarak aşağıda sıralanmıştır. Bu fonksiyonların çoğu birbirine bağlı veya birbirinin tamamlayıcısı niteliğindedir.

- Anahtarlama geçişleri esnasında akım ve gerilimin üstüste binmesini azaltmak.
- Akım ve gerilimin yükselme hızlarını sınırlamak.
- Yük hattı akım ve gerilim değişimlerini düzenlemek
- Anahtarlama enerji kayıplarını bastırmak.
- EMI ve RFI gürültülerini bastırmak.
- Anahtarlama enerjilerini geri kazanmak.
- Çalışma frekansını yükseltmek.
- Peryodun büyük bir kısmında PWM çalışmayı korumak.
- Hafif yüklerde de yumuşak anahtarlama sürdürmek.
- Devrenin boyut ve maliyetini düşürmek.
- Devrenin verim ve güç yoğunluğunu arttırmak.

## 2.5 Yumuşak Anahtarlama Teknikleri

Yumuşak anahtarlama teknikleri, genel olarak,

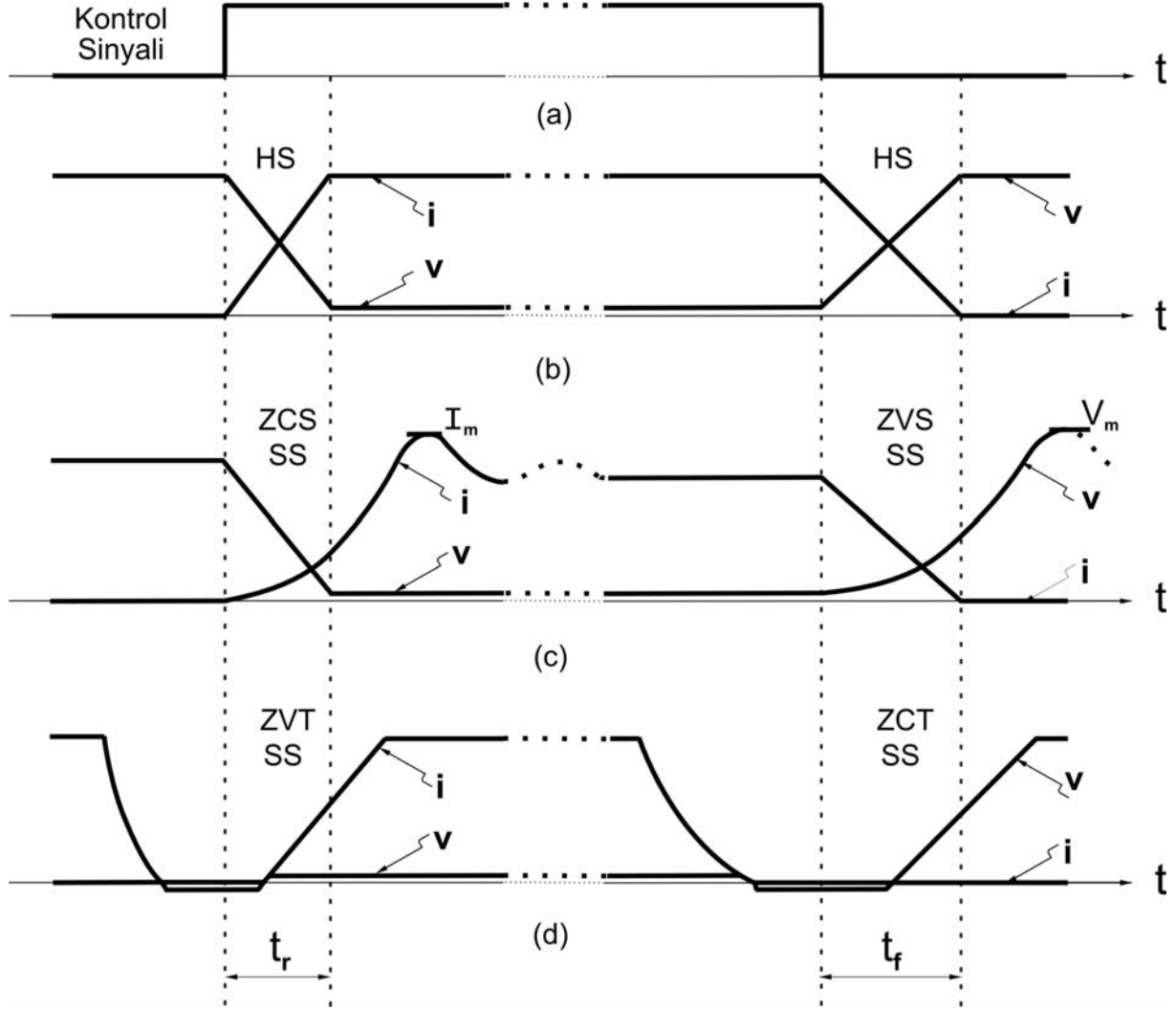
- 1) Sıfır akımda anahtarlama (ZCS)
- 2) Sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS)
- 3) Sıfır akımda geçiş (ZCT)
- 4) Sıfır gerilimde geçiş (ZVT)

şeklinde 4 genel gruba ayrılır. Şekil 2.3'te, bir anahtarlama elemanının kontrol sinyali ile sert anahtarlama (HS) ve yumuşak anahtarlama (SS) teknikleriyle ilgili temel dalga şekilleri görülmektedir. ZCS ile ZVS temel ve ZCT ile ZVT ileri yumuşak anahtarlama teknikleridir (Bodur vd., 2002).

### 2.5.1 Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS)

Sıfır akımda anahtarlama (ZCS), iletme girme işleminde gerçekleştirilen bir SS tekniğidir. Bu teknikte, temel olarak güç anahtarına küçük değerli bir endüktans seri bağlanarak, iletme

girme işleminde elemandan geçen akımın yükselme hızı sınırlanır. Böylece, akım ile gerilimin üstüste binmesi ve anahtarlama enerji kaybı azaltılır. Aslında, iletme girme işlemindeki anahtarlama enerjisi endüktansa aktarılır. Endüktanstaki bu enerji, klasik hücrelerde bir dirençte harcanır, fakat modern hücrelerde kısa süreli bir kısmi rezonans ile gerilim kaynağı veya yüke aktarılarak geri kazanılır.



Şekil 2.3 (a) Bir anahtarlama güç elemanın kontrol sinyali ile (b) HS, (c) ZCS ile ZVS ve (d) ZCT ile ZVT çalışmalarıyla ilgili temel dalga şekilleri (Bodur vd., 2002).

### 2.5.2 Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS)

Sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS), kesime girme işleminde gerçekleştirilen bir SS tekniğidir. Bu teknikte, temel olarak güç anahtarına küçük değerli bir kondansatör paralel bağlanarak, iletimden çıkma işleminde elemanın uçlarında oluşan gerilimin yükselme hızı sınırlanır. Böylece, iletimden çıkma işleminde, anahtarlama enerji kaybı azaltılır ve anahtarlama enerjisi kondansatöre aktarılır. Kondansatördeki bu enerji, modern hücrelerde geri kazanılır.

ZCS ve ZVS tekniklerinde anahtarlama enerji kaybı tamamen yok edilememektedir. Bu nedenle, bu tekniklere yaklaşık ZCS ve yaklaşık ZVS teknikleri de denilmektedir. Genel olarak, ZCS'de kullanılan endüktansa seri bastırma elemanı ve ZVS'de kullanılan kondansatöre paralel bastırma elemanı denilir. Normal olarak, seri endüktans güç elemanı üzerinde ilave bir gerilim stresine ve paralel kondansatör ise ilave bir akım stresine neden olur. Seri endüktansın neden olduğu ek gerilim stresinin önlenemediği kabul edilmektedir.

### **2.5.3 Sıfır Akımda Geçiş (ZCT)**

Sıfır akımda geçiş (ZCT), kesime girme işleminde gerçekleştirilen ileri bir SS tekniğidir. Bu teknikte, güç anahtarından geçen akım kısa süreli bir kısmi rezonansla sıfıra düşürülür ve akım sıfırda tutulurken kontrol sinyali kesilir. Böylece, akım ile gerilimin üstüste binmesi ve anahtarlama enerji kaybı tamamen yok edilir. Mükemmel bir kesime girme işlemi sağlanır. Burada hem ZCS hem de ZVS'nin sağlandığı söylenebilir. Akımın sıfıra düşmesi ileri alınarak gerçekleştirilen bir SS tekniğidir. Anahtarlama enerjisinin geri kazanıldığı bu teknik, ancak modern hücrelerle sağlanabilir ve bir yardımcı veya ilave yarı iletken anahtar gerektirir.

### **2.5.4 Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT)**

Sıfır gerilimde geçiş (ZVT), ilettime girme işleminde uygulanan ileri bir SS tekniğidir. Bu teknikte, güç anahtarı uçlarındaki gerilim kısa süreli bir kısmi rezonansla sıfıra düşürülür ve bu gerilim sıfırda tutulurken kontrol sinyali uygulanır. Böylece, anahtarlama enerji kaybı tamamen yok edilir ve mükemmel bir ilettime girme işlemi sağlanır. Gerilimin sıfıra düşmesi ileri alınarak gerçekleştirilen bu teknikte de hem ZVS hem de ZCS'nin sağladığı söylenebilir. Anahtarlama enerjisinin geri kazanıldığı bu teknik de modern hücrelerle elde edilir ve ilave bir anahtar gerektirir.

Burada hemen şunun belirtilmesi gerekir ki, sadece bu teknikte güç anahtarının parazitik kondansatörünün deşarj enerji kaybı yok edilir ve bu enerji geri kazanılır. Yüksek değerlerde parazitik kondansatörlere sahip olan MOSFET güç elemanlarında bu SS tekniği büyük önem taşır.

## **2.6 Bastırma Hücrelerinin Sınıflandırılması**

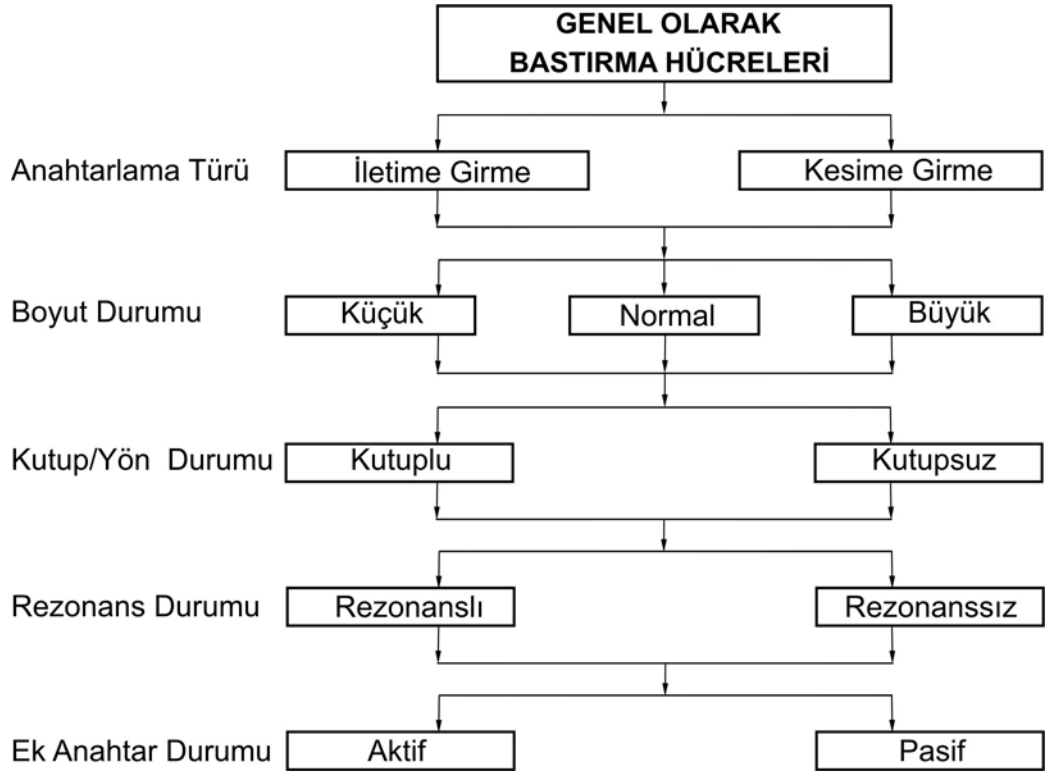
Bastırma hücreleri, genel olarak Şekil 2.4'te görüldüğü gibi, anahtarlama türüne, boyuta, yön ve rezonans ile ilave bir anahtarın olup olmamasına göre sınıflandırılır. Ayrıca, gelişmişlik ölçüsüne göre bastırma hücreleri Şekil 2.5'te verildiği gibi sınıflandırılabilir (Bodur vd., 2002).

Bir bastırma hücresi, genellikle ya iletim ya da kesime girme işleminde yumuşak anahtarlamaı sağlamak üzere tasarlanır. Bazen, belirli kriterlerle hücrenin boyutu tanımlanır. Kontrollü güç elemanlarında, genellikle kutuplu veya tek yönlü bastırma hücreleri kullanılır. Özellikle diyot ve tristörlerde, ters toparlanma işlemlerinde de etkili olması için kutupsuz veya iki yönlü hücreler kullanılır.

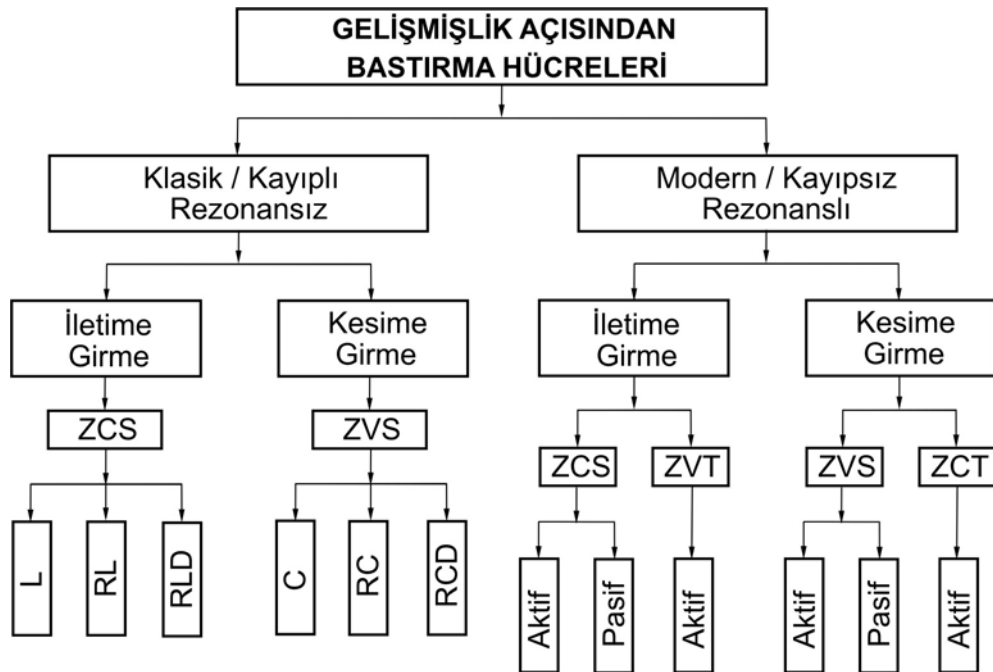
Rezonansız hücreler klasik ve rezonanslı olanlar ise modern hücrelerdir. Buradaki rezonans, sadece anahtarlama işlemleri esnasında etkili olan geçici veya kısmi bir rezonanstır. Kısmi rezonans, temel olarak, bastırma işleminin kısa süreli ve mükemmel olması ile bastırma enerjisinin geri kazanılmasını sağlar.

Hiçbir ilave veya yardımcı anahtar içermeyen hücreler pasif ve en az bir yardımcı anahtarın kullanıldığı hücreler aktif olarak adlandırılmaktadır.

Buradaki sınıflandırmalarda, bütün bastırma hücreleri ayrı ve etraflı bir şekilde verilmiştir. Ancak, uygulamalarda bir güç elemanının yumuşak anahtarlama ile hem iletim hem de kesime girmesi istenmektedir. Bunun için, iki bastırma hücresinin birlikte kullanılması gerekir. Bu durumda, bastırma hücrelerinin veya ilave devrelerin toplamı, bir tek hücre olarak kabul edilir ve tasarım bir bütün olarak yapılır. Hatta dönüştürücüler, genellikle bastırma hücresine göre adlandırılır. ZCS-PWM dönüştürücü, ZVT-PWM dönüştürücü ve ZCS-ZVS-PWM dönüştürücü gibi.



Şekil 2.4 Bastırma hücrelerinin genel olarak sınıflandırılması (Bodur vd., 2002).



Şekil 2.5 Bastırma hücrelerinin gelişmişlik açısından sınıflandırılması (Bodur vd., 2002).

## 2.7 Bastırma Hücrelerinin Karşılaştırılması

Klasik ve modern bastırma hücreleri Tablo 2.1’de etraflı olarak karşılaştırılmıştır. Özet olarak, klasik hücreler, rezonanssız, kayıplı ve pasif hücrelerdir. Modern hücreler ise, kısmi rezonanslı, kayıpsız ve aktif veya pasif hücrelerdir (Bodur vd., 2002).

Çizelge 2.1 Klasik ve modern bastırma hücrelerinin karşılaştırılması (Bodur vd., 2002).

Klasik Bastırma Hücreleri	Modern Bastırma Hücreleri
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rezonans devresi mevcut değildir.</li> <li>▪ Yardımcı bir anahtar yoktur</li> <li>▪ İletime girme işleminde ZCS sağlanır.</li> <li>▪ Kesime girme işleminde ZVS sağlanır.</li> <li>▪ Anahtarlama enerji kayıpları, büyük ölçüde bastırılır.</li> <li>▪ Anahtarlama enerjileri, geri kazanılamaz ve dirençlerde harcanır.</li> <li>▪ Ana anahtar üzerinde, ZCS’de ilave gerilim ve ZVS’de ise ilave akım stresi oluşur.</li> <li>▪ Bastırma hücresinin çalışması hat gerilimi ve yük akımına büyük ölçüde bağlıdır. Yani değişken ve hafif yük şartları altında çalışma oldukça zordur.</li> <li>▪ Düşük frekanslı klasik devreler için uygundur.</li> <li>▪ Basit yapılı ve ucuzdur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hepsi kısmi rezonanslıdır.</li> <li>▪ Aktif olanlarında yardımcı anahtar vardır.</li> <li>▪ İletime girme işleminde ZCS sağlanır.</li> <li>▪ Kesime girmede ZVS sağlanır.</li> <li>▪ Anahtarlama enerji kayıpları, pasif olanlarda büyük ölçüde, aktif olanlarda ise tamamen bastırılır.</li> <li>▪ Anahtarlama enerjileri, pasif olanlarda büyük ölçüde, aktif olanlarda ise tamamen geri kazanılır.</li> <li>▪ Ana anahtar üzerinde, pasif olanlarda genellikle ilave stresler oluşur, aktif olanlarda ise hiçbir ilave stres oluşmayabilir.</li> <li>▪ Bastırma hücresinin çalışması hat gerilimi ve yük akımına pasif olanlarda epeyce bağlıdır, aktif olanlarda bu bağlılık büyük ölçüde azaltılabilir ve hatta yok edilebilir.</li> <li>▪ Yüksek frekanslı modern devreler için gerekli bastırıcılarıdır.</li> <li>▪ Pasif olanların basit yapılı ve ucuz, fakat aktif olanların daha karmaşık ve pahalı olduğu kabul edilebilir.</li> </ul> <p><b>Ayrıca,</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aktif olanlarda, yardımcı anahtar içinde yumuşak anahtarlamanın sağlanması oldukça önemlidir ve bu sağlanabilir.</li> <li>▪ Parazitik kondansatörün deşarj enerji kaybının yok edilmesi ve bu enerjinin geri kazanılması, sadece aktif olan ZVT’de mümkün olmaktadır. Bu ise MOSFET için çok önemlidir.</li> </ul>

## 2.8 Sonuç

Yumuşak anahtarlama, temel olarak anahtarlama kayıpları ile EMI gürültülerin yok edilmesi veya en aza indirilmesidir. Anahtarlama kayıpları ise, anahtarlama esnasında güç anahtarının akım ve geriliminin üstüste binme kaybı ile güç diyodunun ters toparlanma kaybı ve anahtarın parazitik kondansatörünün deşarj kaybından oluşmaktadır. SS sağlayan ve ilave devreler olarak bilinen bastırma hücreleri, klasik ve modern olarak iki genel gruba ayrılır. Bu hücreler arasındaki temel fark, modern hücrelerin bir kısmı rezonansa sahip olmalarıdır.

Bir bastırma hücresinden beklenen fonksiyonlar, anahtarlama kayıpları ve EMI gürültülerin bastırılması, anahtarlama enerjilerinin geri kazanılması, hafif yük şartlarında da yumuşak anahtarlamanın sürmesi veya zamanın çoğunda PWM çalışmanın korunması, ana elemanlar üzerinde ilave akım ve gerilim streslerinin oluşmaması veya en az düzeyde kalması, devrenin boyut ve maliyetinin düşmesi ile verim ve güç yoğunluğunun artması şeklinde sıralanabilir. Bu fonksiyonların çok az bir kısmı klasik, büyük bir kısmı modern pasif ve tamamına yakın bir kısmı ise modern aktif hücreler ile sağlanabilmektedir.

Sonuç olarak, devrenin güç yoğunluğunu arttırmanın ana amaç olduğu daima göz önünde tutulmalı, bir bastırma hücresinin sağladığı SS yararları ile devreye yüklediği külfetler iyice karşılaştırılmalı ve nihai seçim yapılmalıdır.



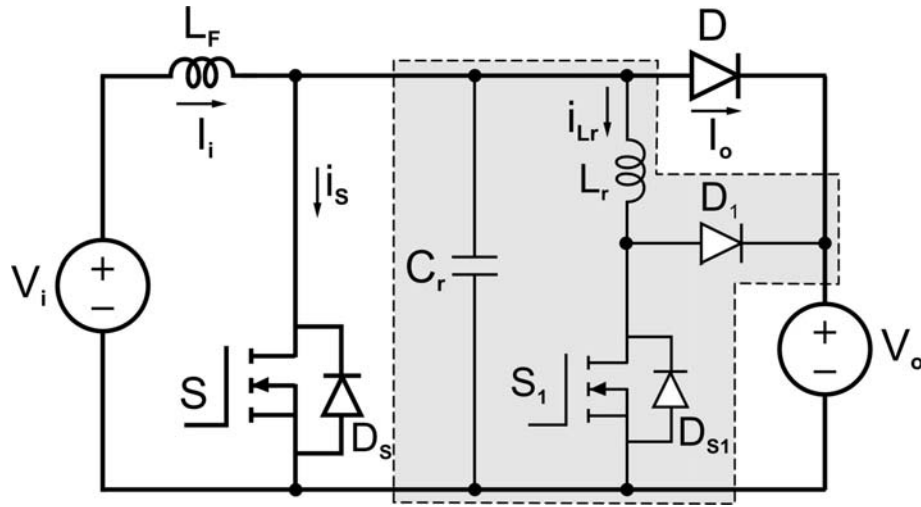
### 3. TEMEL ZVT PWM DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ

#### 3.1 Giriş

Bu bölümde, son yıllarda yapılan akademik ve endüstriyel çalışmalarda çok yer alan ve tek tek incelendiğinde çok kafa karıştıran ZVT tekniklerine genel bir bakış açısının getirilmesi için Hua vd. (1994)'i tarafından önerilen temel ZVT PWM dönüştürücünün çalışma prensibi incelenmiştir.

#### 3.2 Tanım ve Kabuller

Yüksek çıkışlı ZVT-PWM dönüştürücünün devre şeması Şekil 3.1'de verilmiştir. Bu devrenin normal yüksek çıkışlı PWM dönüştürücüden farkı ek bir rezonans devresi içermesidir. Şekil 3.1'de kesikli çizgi ile rezonans devresi gösterilmiştir. Bu rezonans devresi bir rezonans endüktansı ( $L_r$ ), bir yardımcı anahtar ( $S_1$ ) ve bir yardımcı diyot ( $D_1$ ) içermektedir.  $C_r$  rezonans kondansatörü, güç anahtarının parazitik kondansatörüdür.



Şekil 3.1 Temel ZVT PWM DC-DC dönüştürücünün devre şeması (Hua vd., 1994).

Analizi basitleştirmek için, giriş filtre bobinin ideal bir DC akım kaynağı  $I_i$  olarak kabul edilebilecek kadar büyük olduğu ve çıkıştaki filtre kondansatörünün sabit bir  $V_o$  gerilim kaynağı olarak kabul edilebilecek kadar büyük olduğu kabul edilmiştir.

### 3.3 Çalışma Aralıkları

Temel ZVT PWM dönüştürücünün bir anahtarlama periyodu içerisindeki kararlı durum çalışmasında yedi aralık oluşur. Bu aralıkların eşdeğer devre şemaları sırasıyla Şekil 3.2(a)-(g)'de verilmiştir. Bu aralıklarla ilgili temel dalga şekilleri Şekil 3.3'te görülmektedir. Aşağıda sırasıyla bütün çalışma aralıklarının detaylı analizi sunulmuştur.

#### Aralık 1 [ $t_0 < t < t_1$ : Şekil 3.2(a) ]

$t_0$ 'dan önce ana anahtar (S) ve yardımcı anahtar (S1) kesimdedir ve ana diyot (D) iletimdedir.  $t=t_0$  anında S<sub>1</sub>, kontrol sinyalinin uygulanmasıyla ZCS ile iletme girer.  $i_{Lr}$  akımı lineer olarak yükselerek  $t_1$  anında  $I_i$  değerine ulaşır ve D diyodu yumuşak anahtarlama ile kesime girmesiyle bu aralık sona erer. Kesim esnasındaki kontrollü  $dv/dt$  ve  $di/dt$ 'den dolayı, hızlı bir diyot kullanıldığında D diyodunun ters toparlanma akımı ihmal edilebilir. Bu aralıkta,

$$i_{Lr} = \frac{V_o}{L_r}(t - t_0) \quad (3.1)$$

$$i_D = I_i - i_{Lr} = I_i - \frac{V_o}{L_r}(t - t_0) \quad (3.2)$$

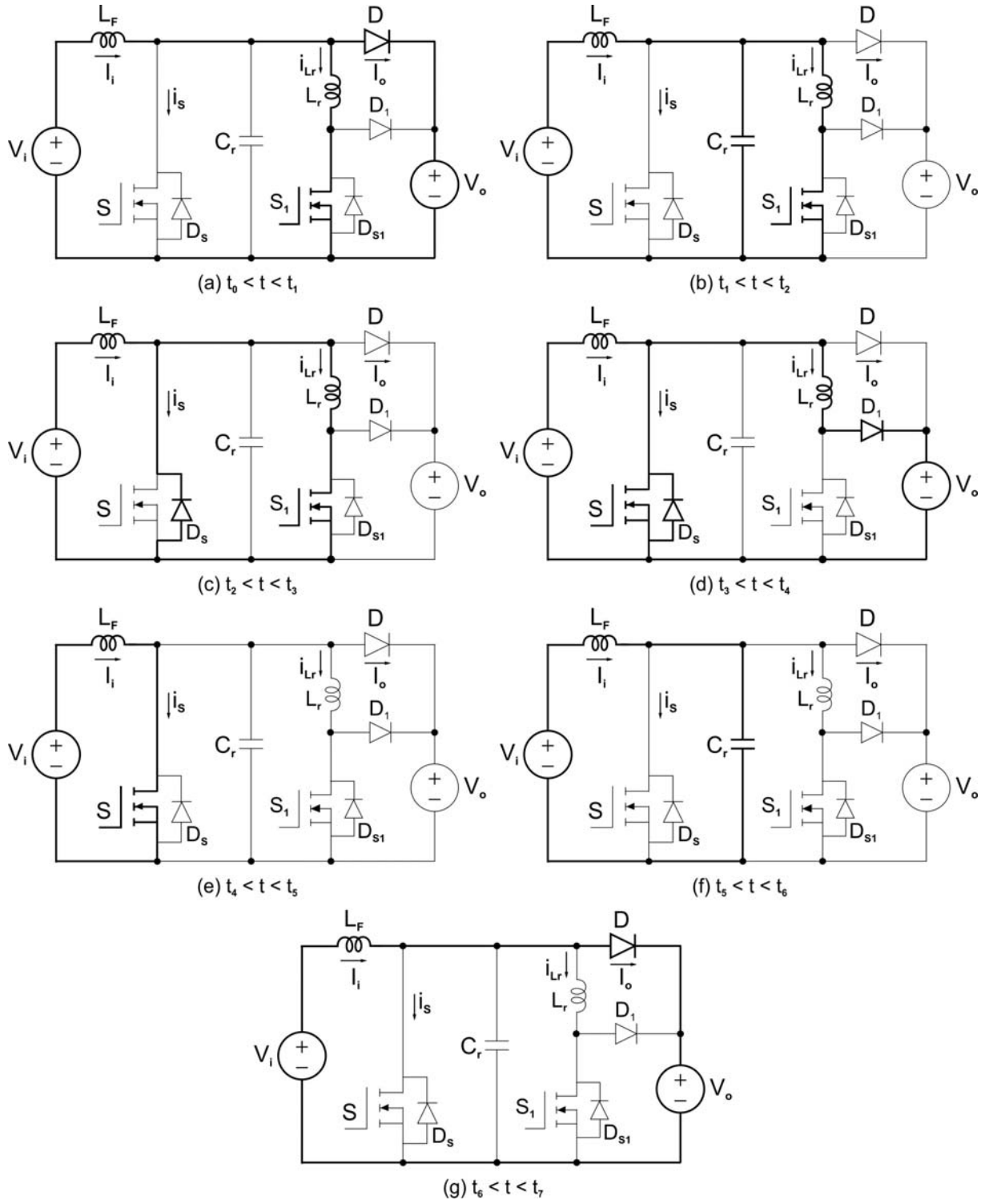
$$v_{Cr} = V_o \quad (3.3)$$

bağıntıları geçerlidir.  $t_{01}$  süresi aşağıdaki eşitlikten bulunabilir.

$$t_{01} = \frac{L_s}{V_o}(I_i) \quad (3.4)$$

#### Aralık 2 [ $t_1 < t < t_2$ : Şekil 3.2(b) ]

$t=t_1$  anında  $i_{Lr}$  akımının  $I_i$ 'ye yükselmesiyle birlikte başlayan bu aralıkta  $C_r$  ve  $L_r$  arasında bir rezonans başlar. Rezonans nedeniyle  $i_{Lr}$  akımı artmaya devam eder.  $C_r$  kondansatörünün gerilimi rezonans ile azalarak  $t=t_2$  anında sıfır olur ve  $i_{Ls}$  akımı maksimum değerine erişir. S'nin ters paralel diyodu D<sub>S</sub>'nin iletme girmesiyle bu aralık sona erer.  $C_r$ 'deki enerji  $L_r$ 'ye aktarılmış olur. Bu aralık için,



Şekil 3.2 Temel ZVT PWM DC-DC dönüştürücünün eşdeğer çalışma aralıkları.

$$i_{Lr} = i_{S1} = \frac{V_o}{Z_r} \sin \omega_r (t - t_1) + I_i \quad (3.5)$$

$$v_{Cr} = v_S = V_o \cos \omega_r (t - t_1) \quad (3.6)$$

bağıntıları geçerlidir. Bu bağıntılarda,

$$Z_r = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (3.7)$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (3.8)$$

eşitlikleri geçerlidir. Bu bağıntılardan aşağıdaki eşitlikler çıkarılır.

$$t_{12} = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_r C_r} \quad (3.9)$$

$$I_{Lrmax} = \frac{V_o}{Z} + I_i \quad (3.10)$$

**Aralık 3** [  $t_2 < t < t_3$  : Şekil 3.2(c) ]

$D_S$  iletimdedir ve  $I_{Lrmax} - I_i$  akımını geçirmektedir. Bu aralıkta  $D_S$  diyodu iletimini sürdürür ve  $S$  gerilimi sıfırda tutulur. ZVT'nin gerçekleştirilmesi için  $S$ 'nin kontrol sinyali  $D_S$  iletimde iken verilmelidir. Ayrıca,  $S_1$  ve  $S$ 'nin kontrol sinyalleri arasındaki  $T_D$  gecikme süresi aşağıdaki şartı sağlamalıdır.  $t=t_3$  anında, yardımcı anahtar  $S_1$ 'in sinyali kesilmesiyle bu aralık sona erer. Bu aralıkta,

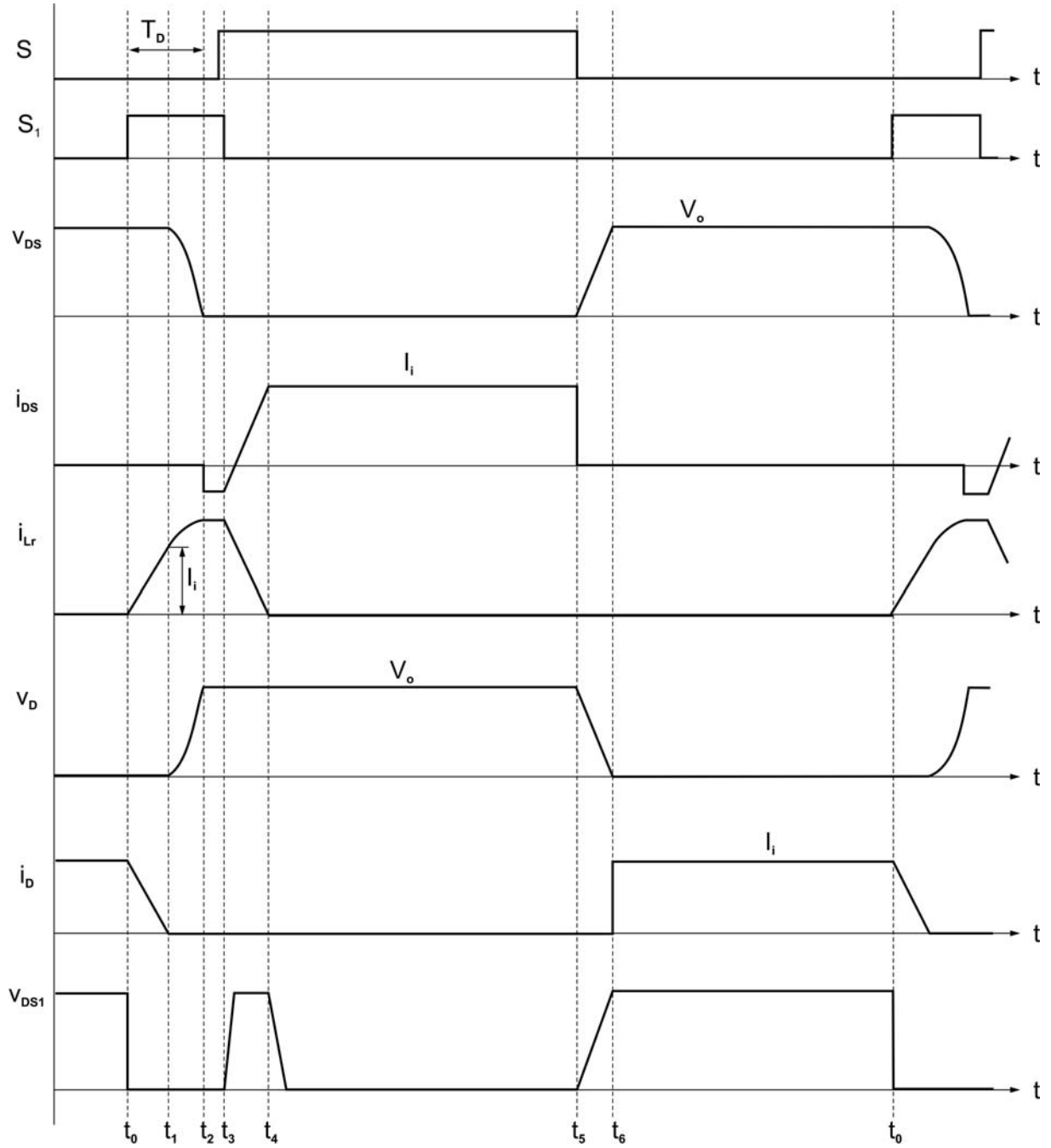
$$i_{Lr} = i_{S1} = I_{Lrmax} \quad (3.11)$$

$$i_S = I_i - I_{Lrmax} \quad (3.12)$$

$$T_D \geq t_{01} + t_{12} = \frac{I_i}{V_o} L_r + \frac{\pi}{2} \sqrt{L_r C_r} \quad (3.13)$$

$t_{34}$ =seçilir

eşitlikleri geçerlidir.



Şekil 3.3 Temel ZVT dönüştürücünün temel dalga şekilleri.

**Aralık 4** [  $t_3 < t < t_4$  : Şekil 3.2(d) ]

$t=t_3$  anında,  $S_1$ 'in kontrol sinyalinin kesilmesiyle,  $S_1$  sert olarak kesime ve  $D_1$  ilettime girer. Rezonans bobininde depo edilen enerji bu aralıkta yüke aktarılır.  $i_{Lr}$  lineer olarak azalır.  $i_{Lr}$  akımının  $I_i$ 'ye düşmesiyle birlikte ve  $D_s$  akımı 0'a düşer.  $D_s$  söner ve  $S$  anahtarı ZVS ile ilettime girer.  $i_{Lr}$  akımı lineer olarak azalmaya devam eder ve  $i_s$  akımı da lineer olarak artar.  $t=t_4$  anında  $i_s$  akımının  $I_i$ 'ye eriştiğinde ve  $i_{Lr}$  akımı 0'a düşer. Böylece  $L_r$ 'de biriken

enerjilerinin çıkışa aktarılması tamamlanır. Bu aralıkta,

$$i_{Lr} = I_{Lr\max} - \frac{V_o}{L_r}(t - t_3) \quad (3.14)$$

$$i_s = I_i - i_{Lr} = I_i - I_{Lr\max} + \frac{V_o}{L_r}(t - t_3) \quad (3.15)$$

bağıntıları elde edilir. Bu bağıntılardan,

$$t_{34} = \frac{I_{Lr\max}}{V_o} L_r \quad (3.16)$$

elde edilir.

**Aralık 5** [  $t_4 < t < t_5$  : Şekil 3.2(e) ]

Bu aralık boyunca, ana anahtar S giriş akımı  $I_i$ 'yi iletmeye devam eder. Bu kademe süresi, normal PWM dönüştürücünün iletim durumunun büyük bir kısmıdır ve PWM kontrolü tarafından belirlenir. Bu aralık için,

$$i_s = I_i \quad (3.17)$$

$$t_{45} = f(\lambda) \quad (3.18)$$

yazılabilir.

**Aralık 6** [  $t_5 < t < t_6$  : Şekil 3.2(f) ]

$t=t_5$  anında ana anahtarın kontrol sinyalinin kesilmesiyle başlayan bu aralıkta sabit giriş akımı  $I_i$  altında  $C_r$  kondansatörü şarj olur.  $C_r$ 'nin gerilimi lineer olarak artar ve  $V_o$  çıkış gerilimine ulaştığında D iletme girer ve bu aralık sona erer. Bu aralıkta aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$v_{Cr} = \frac{I_i}{C_r}(t - t_5) \quad (3.19)$$

$$t_{56} = \frac{V_o}{I_i} C_r \quad (3.20)$$

**Aralık 7** [  $t_6 < t < t_7 = t_0$  : Şekil 3.2(g) ]

Bu kademe boyunca, ana diyot D giriş akımı  $I_i$ 'yi iletmeye devam eder. Bu aralığın süresi, normal PWM dönüştürücünün kesim aralığının büyük bir kısmıdır ve PWM kontrolü tarafından belirlenir. Bu kademe için,

$$i_D = I_i \quad (3.21)$$

$$t_{67} = f(\lambda) \quad (3.22)$$

yazılabilir.

Böylece,  $t = t_7 = t_0$  anında, bir anahtarlama periyodu tamamlanır ve başka bir anahtarlama periyodu başlar.

Çizelge 3.1 Devrede kullanılan aktif ve pasif yarı iletken elemanların anahtarlama durumları ve maruz kaldıkları maksimum gerilim ve akım değerleri.

Eleman	İletime Girme	Kesime Girme	Elemanların Maruz Kaldığı	
			Maksimum Gerilim	Maksimum Akım
S	ZVT (ZCS, ZVS)	ZVS	$V_o$	$I_i$
$S_1$	ZCS	Sert	$V_o$	$\frac{V_o}{Z} + I_i$
D	ZVS	ZCS, ZVS	$V_o$	$I_i$

### 3.4 Sonuç

ZVT tekniği, rezonans ve PWM tekniklerinin iyi yönlerinin birleştirilmesi düşünceci ile ortaya çıkmıştır. Temel prensibi, kısa süreli bir rezonans ile anahtar uçlarındaki gerilimin önceden sıfıra düşürülmesi, bu gerilimin bir süre sıfırda tutulması, sonra sinyal verilerek anahtarın ZVS ile ilettime sokulmasıdır. ZVT tekniği, modern ve mükemmel bir ilettime girme işlemini sağlar. Ayrıca, ZVT tekniğinde ana diyodun ters toparlanma ve parazitik kondansatörün deşarj enerjileri de geri kazanılır. Ana ve yardımcı anahtarların kesime girme işlemlerinin iyileştirilmesi, gelişmiş ZVT devrelerinin temel konusudur. Devrenin başlıca mahsurları aşağıda sıralanmıştır.

1. Yardımcı anahtar  $S_1$  sert anahtarlama ile kesime girer.
2. Ana anahtar  $S$ 'nin kesime girme işlemini uçlarındaki paralel rezonans kondansatörü  $C_r$ 'nin sabit akımla şarjı ile sağlanır. Bu süre yük akımına bağlıdır. Hafif yüklerde çalışma özelliği kötüdür.
3.  $t_4$  anında  $i_{Lr}=0$  olduğunda yardımcı anahtarın gerilimi ani olarak  $V_o$ 'dan 0'a düşer.  $S_1$ 'in parazitik kondansatörü ile  $L_r$  arasında yüksek frekanslı bir salınım oluşur.



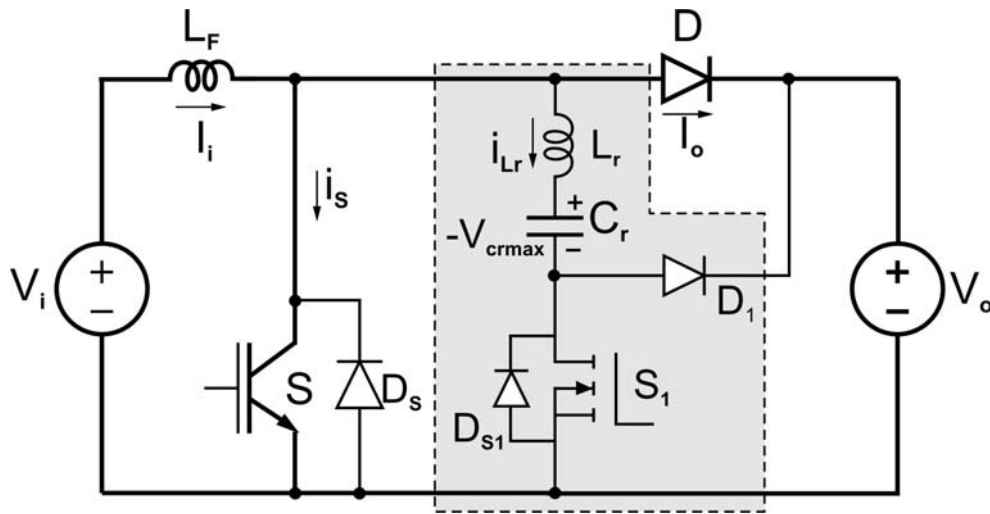
## 4. TEMEL ZCT PWM DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ

### 4.1 Giriş

Bu bölümde, son yıllarda yapılan akademik ve endüstriyel çalışmalarda çok yer alan ve tek tek incelendiğinde çok kafa karıştıran ZCT tekniklerine genel bir bakış açısının getirilmesi için Hua vd. (1994)'i tarafından önerilen temel ZCT PWM dönüştürücünün çalışma prensibi incelenmiştir.

### 4.2 Tanım ve Kabuller

Yüksek çıkışlı ZCT-PWM dönüştürücünün devre şeması Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu devrenin normal yüksek çıkışlı PWM dönüştürücüden farkı ek bir rezonans devresi içermesidir. Şekil 4.1'de kesikli çizgi ile rezonans devresi gösterilmiştir. Bu rezonans devresi bir rezonans endüktansı ( $L_r$ ), rezonans kondansatörü ( $C_r$ ), bir yardımcı anahtar ( $S_1$ ) ve bir yardımcı diyot ( $D_1$ ) içermektedir.



Şekil 4.1 Temel ZCT PWM DC-DC dönüştürücünün devre şeması (Hua vd., 1994).

Analizi basitleştirmek için, giriş filtre bobinin ideal bir DC akım kaynağı  $I_i$  olarak kabul edilebilecek kadar büyük olduğu ve çıkıştaki filtre kondansatörünün sabit bir  $V_o$  gerilim kaynağı olarak kabul edilebilecek kadar büyük olduğu kabul edilmiştir.

### 4.3 Çalışma Aralıkları

Temel ZCT PWM dönüştürücünün bir anahtarlama periyodu içerisindeki karalı durum çalışmasında beş aralık oluşur. Bu aralıkların eşdeğer devre şemaları sırasıyla Şekil 4.2(a)-(e)'de verilmiştir. Bu aralıklarla ilgili temel dalga şekilleri Şekil 4.3'te görülmektedir. Aşağıda sırasıyla bütün çalışma aralıklarının detaylı analizi sunulmuştur.

**Aralık 1** [  $t_0 < t < t_1$  : Şekil 4.2(a) ]

$t_0$  anından önce, S ana anahtarı iletimdedir ve  $C_r$  rezonans kondansatörü  $-V_{Crmax}$  gerilimi ile doludur.  $t=t_0$  anında,  $S_1$ 'e kontrol sinyalinin uygulanmasıyla birlikte  $S_1$  anahtarı yumuşak anahtarlama ile ilettime girer ve  $L_r$  ile  $C_r$  arasında bir rezonans başlar. Sinüsoidal olarak  $i_{Lr}$  artar ve  $i_s$  akımı düşer.  $i_{Lr}$  akımının  $I_i$ 'ye erişmesiyle  $i_s$  akımı 0'a düşer. Ana transistör S kesime ve dahili diyodu  $D_s$  iletime girer. Rezonans akımının sinüsoidal değişimi sürer.  $D_s$  diyodu  $i_{Ls}-I_i$  akımını üstlenir. Çeyrek rezonans periyodu  $t_{d1}$  sonunda,  $i_{Lr}$  akımı maksimum olur, bu anda S'nin kontrol sinyali kesilir.  $t=t_1$  anında,  $i_{Lr}$  akımı  $I_i$ 'ye geri düşer,  $D_s$  akımı 0 olur,  $D_s$  kesime girer ve  $S_1$ 'in kontrol sinyali kesilir. Aynı anda,  $S_1$  sert olarak kesime ve  $D_1$  ile D iletime girer. Ana transistör için ZCT ile kesime girmeyi sağlayabilmek için  $I_{Lrmax}$ 'ın değeri  $I_i$ 'den büyük olmalıdır. Bu aralıkta,

$$i_{Lr} = i_{S1} = \frac{V_{Crmax}}{Z_r} \sin \omega_r (t - t_0) \quad (4.1)$$

$$v_{Cr} = -V_{Crmax} \cos \omega_r (t - t_0) \quad (4.2)$$

$$I_{Lrmax} = \frac{V_{Crmax}}{Z_r} \quad (4.3)$$

$$t_{d1} = \frac{1}{4} T_r \quad (4.4)$$

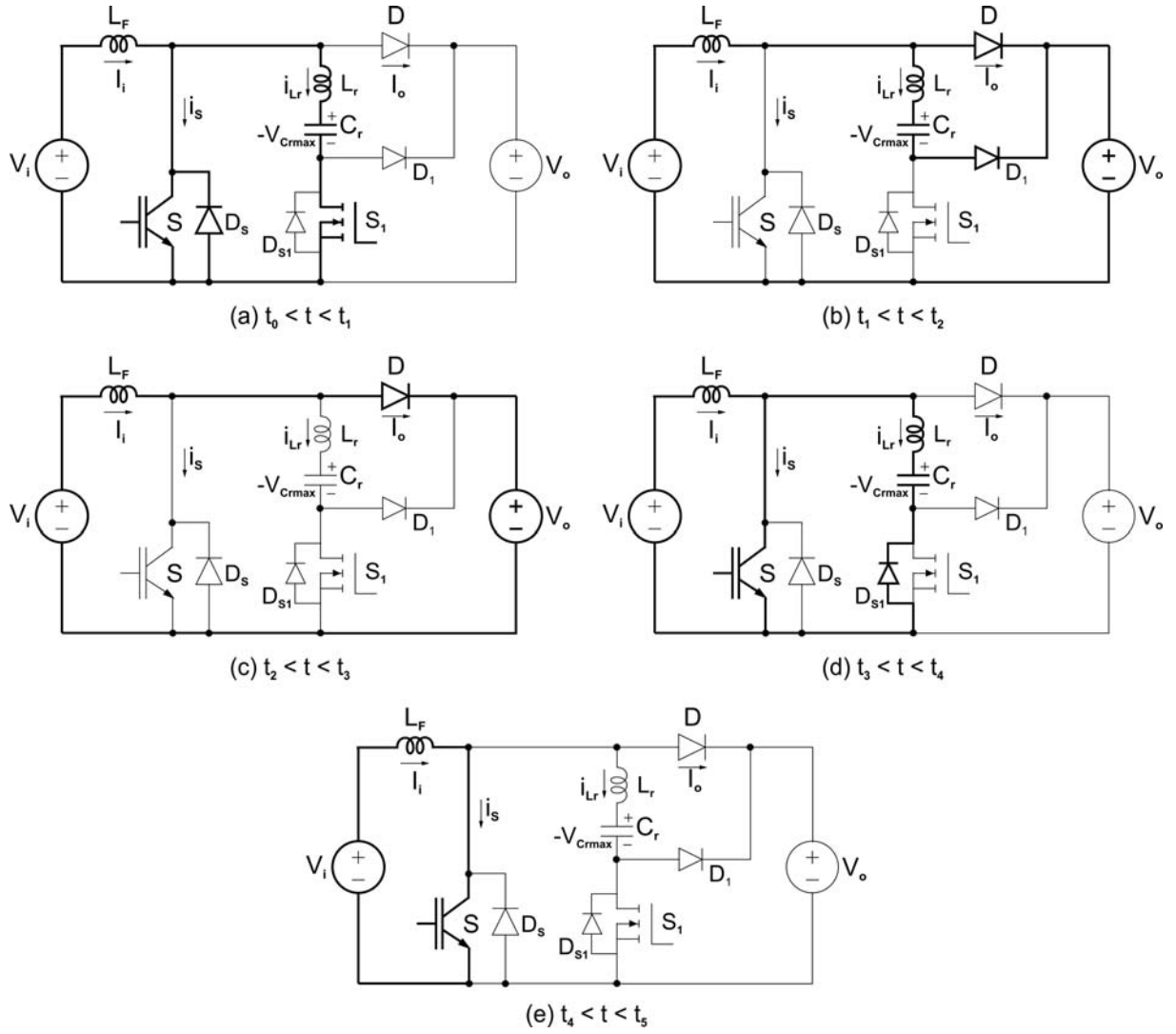
eşitlikleri geçerlidir. Bu eşitliklerde,

$$Z_r = \sqrt{L_r / C_r} \quad (4.5)$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (4.6)$$

$$T_r = 2\pi \sqrt{L_r C_r} \quad (4.7)$$

bağıntıları geçerlidir.



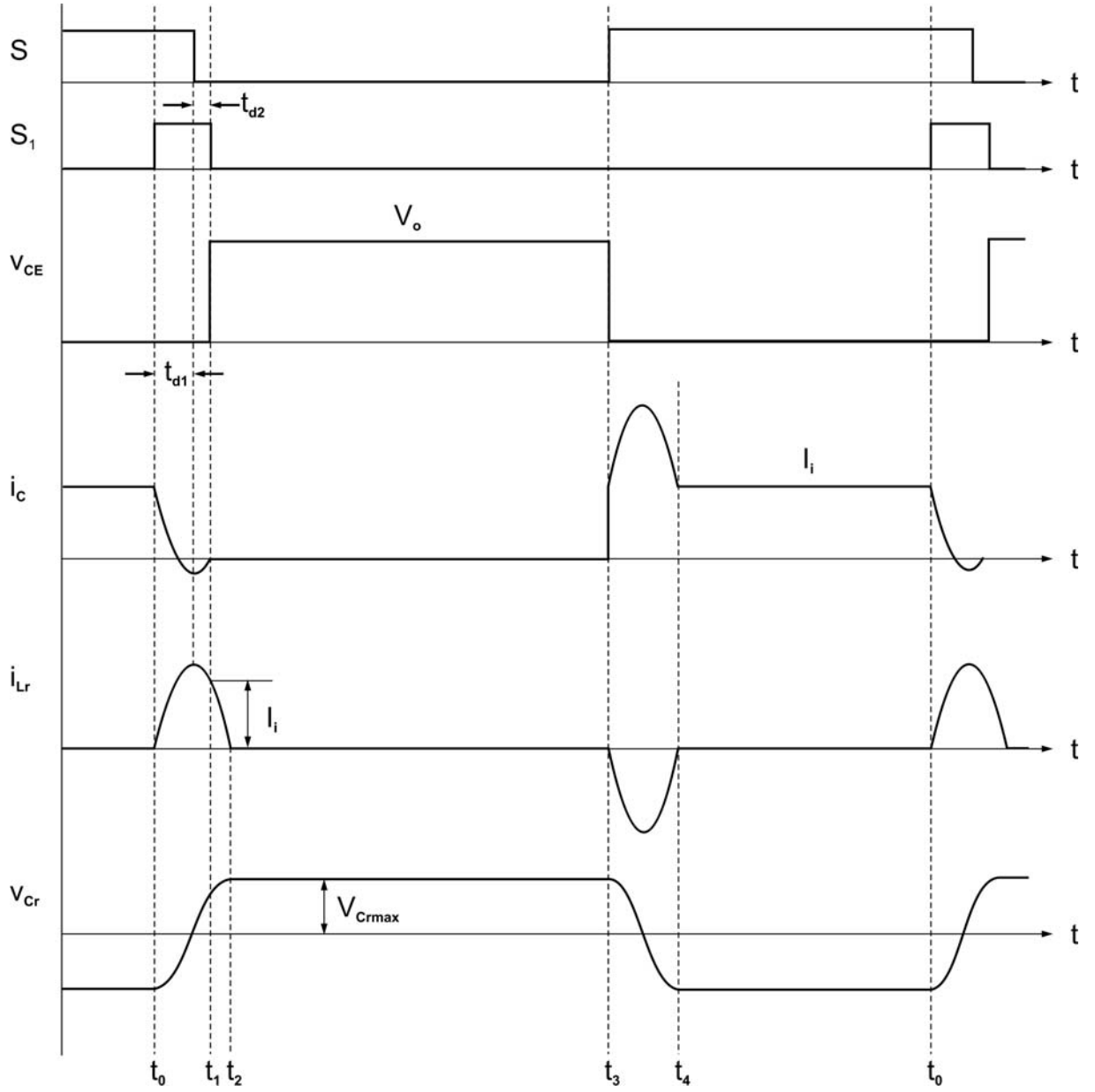
Şekil 4.2 Temel ZCT PWM DC-DC dönüştürücünün eşdeğer çalışma aralıkları.

**Aralık 2** [  $t_1 < t < t_2$  : Şekil 4.2(b) ]

$L_r$  ve  $C_r$  arasındaki rezonans,  $L_r$ - $C_r$ - $D_1$ - $D$  yolu ile devam eder.  $t_4$  anında,  $i_{L_r}$  akımının sıfır olmasıyla  $D_1$  kesime girer ve bu aralık sona erer.  $D$  akımı  $I_i$ 'ye ve  $v_{C_s}$  gerilimi  $V_{C_{smax}}$ 'a erişir. Bu aralıkta aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$i_{L_r} = \frac{V_{C_rmax}}{Z_r} \sin \omega_r (t - t_1) \quad (4.8)$$

$$v_{C_r} = -V_{C_rmax} \cos \omega_r (t - t_1) \quad (4.9)$$



Şekil 4.3 Temel ZCT dönüştürücünün temel dalga şekilleri.

$$i_{DF} = I_i - i_{Lr} \quad (4.10)$$

$$t_{12} = \sqrt{L_r C_r} \arcsin \frac{Z_r \cdot I_i}{V_{Cr \max}} \quad (4.11)$$

**Aralık 3** [  $t_2 < t < t_3$  : Şekil 4.2(c) ]

Bu kademe boyunca, ana diyot D giriş akımı  $I_i$ 'yi iletmeye devam eder. Bu aralığın süresi, normal PWM dönüştürücünün kesim aralığının büyük bir kısmıdır ve PWM kontrolü tarafından belirlenir. Bu kademe için,

$$i_D = I_i \quad (4.12)$$

$$t_{23} = f(\lambda) \quad (4.13)$$

yazılabilir.

**Aralık 4** [  $t_3 < t < t_4$  : Şekil 4.2(d) ]

$t=t_3$  anında ana anahtarın kontrol sinyalinin uygulanması ile D kesime girer. Bu aralıkta  $L_r$ - $C_r$  arasında  $L_r$ - $C_r$ - $S$ - $D_{S1}$  yolu ile bir rezonans başlar. S anahtarından giriş akımı ve rezonans akımı geçer.  $C_r$ 'nin gerilimi yön değiştirerek  $-V_{Crmax}$  olur ve devre başlangıç koşuluna geri döner. Bu aralıkta,

$$i_{Ls} = \frac{V_{Csmax}}{Z_r} \sin \omega_r (t - t_3) \quad (4.14)$$

$$v_{Cs} = -V_{Csmax} \cos \omega_r (t - t_3) \quad (4.15)$$

$$t_{34} = \sqrt{L_r C_r} \arcsin \frac{Z_r I_i}{V_{Crmax}} \quad (4.16)$$

eşitlikleri geçerlidir.

**Aralık 5** [  $t_4 < t < t_5$  : Şekil 4.2(e) ]

Bu aralık boyunca, ana anahtar S giriş akımı  $I_i$ 'yi iletmeye devam eder. Bu kademe süresi, normal PWM dönüştürücünün iletim durumunun büyük bir kısmıdır ve PWM kontrolü tarafından belirlenir. Bu aralık için,

$$i_S = I_i \quad (4.17)$$

$$t_{45} = f(\lambda) \quad (4.18)$$

yazılabilir.

Çizelge 4.1 Devrede kullanılan aktif ve pasif yarı iletken elemanların anahtarlama durumları ve maruz kaldıkları maksimum gerilim ve akım değerleri.

Eleman	İletime Girme	Kesime Girme	Elemanların Maruz Kaldığı	
			Maksimum Gerilim	Maksimum Akım
S	Sert	ZCT(ZCS, ZVS)	$V_o$	$\frac{V_{Cs\max}}{Z_r} + I_i$
$S_1$	ZCS	Sert	$V_o$	$\frac{V_{Cs\max}}{Z_r}$
D	ZCS	Sert	$V_o$	$I_i$

#### 4.4 Sonuç

ZCT tekniği, rezonans ve PWM tekniklerinin iyi yönlerinin birleştirilmesi düşüncesi ile ortaya çıkmıştır. Temel prensibi, kısa süreli bir rezonans ile anahtar içinden geçen akımın önceden sıfıra düşürülmesi, bu akımın bir süre sıfırda tutulması, sonra sinyal kesilerek anahtarın ZCS altında kesime sokulmasıdır. ZCT tekniği, modern ve mükemmel bir kesime girme işlemi sağlar. Ana anahtarların ilettime ve yardımcı anahtarın kesime girme işlemlerinin iyileştirilmesi, gelişmiş ZCT devrelerinin temel konusudur. ZCT tekniğinde, rezonans devresi  $S_a$ 'nın SS ile ilettime ve S'nin ZCS ile kesime girmesini sağlar. Rezonans devresi ile ana devre arasında hiçbir enerji aktarımı olmaz ve devrenin çalışması yük akımına bağlı değildir. Devrenin başlıca mahsurları aşağıda sıralanmıştır.

1. Yardımcı anahtar sert anahtarlama ile kesime girer.
2. Ana anahtarda ilave bir akım stresi mevcut.
3. Ana anahtarın ilettime ve ana diyodun kesime girmesi serttir.

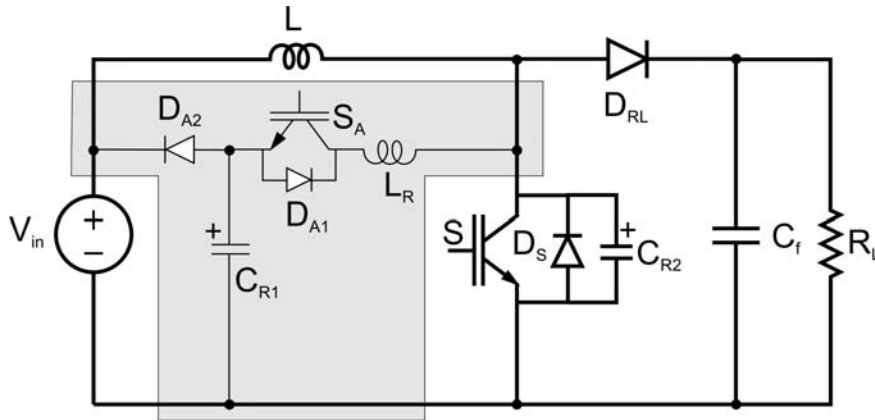
## 5. ZCZVT PWM DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ

### 5.1 Giriş

Bu bölümde, son yıllarda ZVT ve ZCT tekniklerinin birleştirilmesi konusunda yapılan çalışmalardan biri olan Stein vd. (2000) tarafından önerilen ZCZVT'li PWM dönüştürücünün çalışma prensibi incelenmiştir.

### 5.2 Tanım ve Kabuller

Yüksek çıkışlı ZCZVT-PWM dönüştürücünün devre şeması Şekil 5.1'de verilmiştir. Bu devrenin normal yüksek çıkışlı PWM dönüştürücüden farkı ana anahtar uçlarına paralel olarak bağlanmış ek bir rezonans devresi içermesidir. Şekil 5.1'de kesikli çizgi ile rezonans devresi gösterilmiştir. Rezonans devresi, dahili diyotlu ( $D_{A1}$ ) bir yardımcı anahtar ( $S_A$ ), iki rezonans kondansatörü ( $C_{R1}$  ve  $C_{R2}$ ), rezonans endüktansı ( $L_R$ ) ve iki yardımcı diyot ( $D_S$  ve  $D_{A2}$ ) elemanlarından oluşmaktadır.



Şekil 5.1 ZCZVT PWM DC-DC dönüştürücünün devre şeması (Stein vd., 2000).

Analizi basitleştirmek için, giriş filtre bobinin ideal bir DC akım kaynağı  $I_i$  olarak kabul edilebilecek kadar büyük olduğu ve çıkıştaki filtre kondansatörünün sabit bir  $V_o$  gerilim kaynağı olarak kabul edilebilecek kadar büyük olduğu kabul edilmiştir.

### 5.3 Çalışma Aralıkları

ZCZVT dönüştürücünün bir anahtarlama periyodu içerisindeki kararlı durum çalışmasında ondört aralık oluşur. Bu aralıkların eşdeğer devre şemaları sırasıyla Şekil 5.2(a)-(n)'de verilmiştir. Bu aralıklarla ilgili temel dalga şekilleri Şekil 5.3'te görülmektedir. Aşağıda sırasıyla bütün çalışma aralıklarının detaylı analizi sunulmuştur.

**Aralık 1** [  $t_0 < t < t_1$  : Şekil 5.2(a) ]

Bu aralıkta, ana anahtar (S) ve yardımcı anahtar ( $S_A$ ) kesimdedir ve ana diyot ( $D_{RL}$ ) iletimdedir.  $C_{R1}$  ve  $C_{R2}$  rezonans kondansatörleri sırasıyla  $V_{C13}$  ve  $V_o$  gerilimi ile doludur.  $t=t_1$  anında,  $S_A$ 'ya kontrol sinyalinin uygulanmasıyla bu aralık sona erer.

**Aralık 2** [  $t_1 < t < t_2$  : Şekil 5.2(b) ]

$t=t_1$  anında,  $S_A$ 'nın ZCS ile iletme girmesiyle başlayan bu aralıkta  $L_R$  ve  $C_{R1}$  arasında bir rezonans başlar.  $i_{LR}$  akımı ve  $v_{CR1}$  gerilimi artar.  $v_{CR1}$  geriliminin  $V_i$ 'ye ulaşmasıyla  $D_{A2}$  iletime girer ve bu aralık biter. Bu aralık için,

$$i_{LR} = -\frac{(v_{C13} - V_o)}{Z_1} \sin(\omega_1(t - t_1)) \quad (5.1)$$

$$v_{CR1} = (v_{C13} - V_o) \cos(\omega_1(t - t_1)) + V_o \quad (5.2)$$

$$\Delta t_{12} = \frac{1}{\omega_1} \cos^{-1}\left(\frac{V_i - V_o}{v_{C13} - V_o}\right) \quad (5.3)$$

bağıntıları yazılabilir. Bu bağıntılarda,

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L_R}{C_{R1}}} \quad (5.4)$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_R C_{R1}}} \quad (5.5)$$

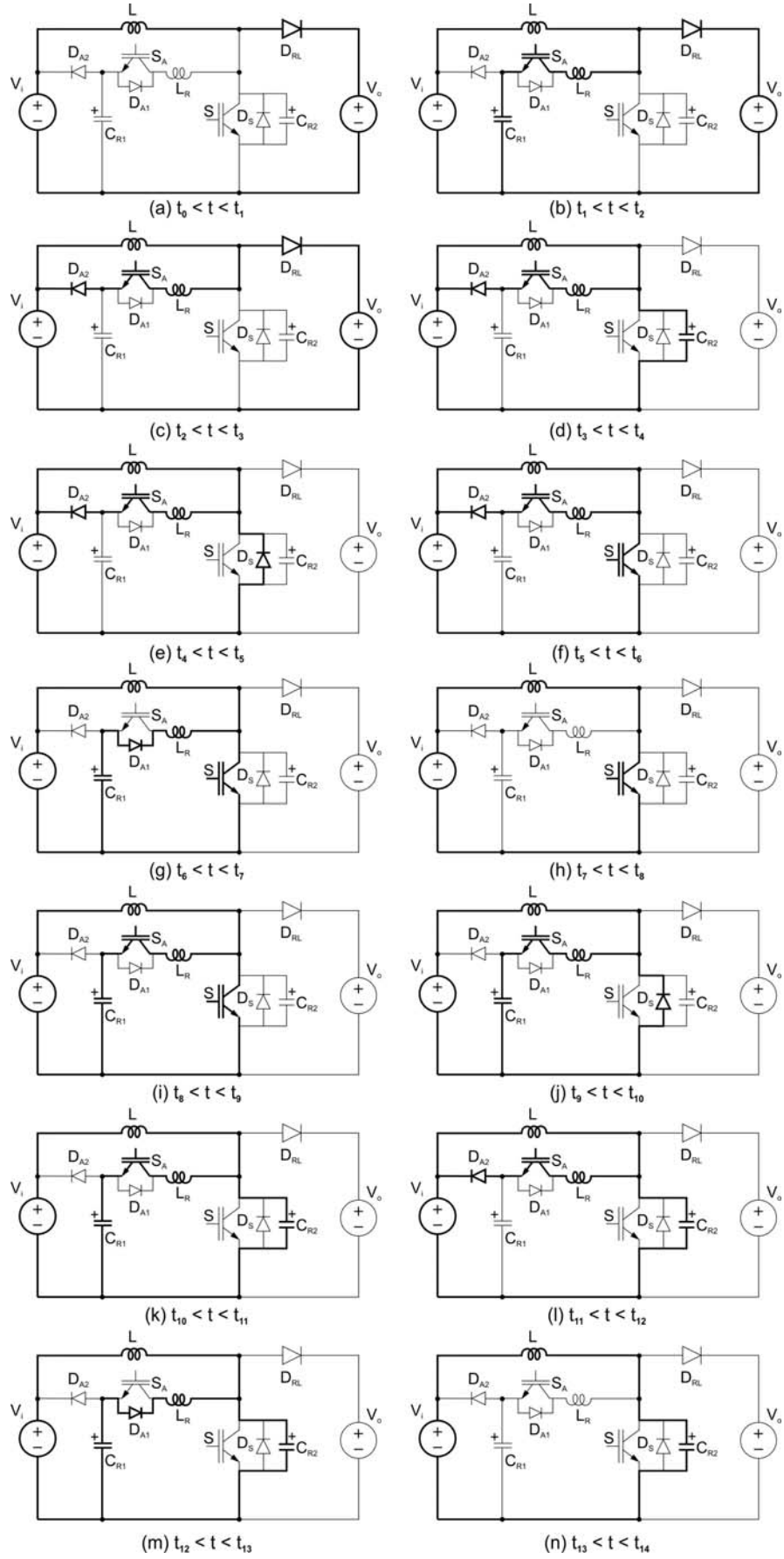
eşitlikleri geçerlidir. Bu aralığın sonunda  $i_{LR}=I_{L2}$ 'ye eşittir.

**Aralık 3** [  $t_2 < t < t_3$  : Şekil 5.2(c) ]

$t=t_2$  anında  $D_{A2}$ 'nin iletime girmesiyle başlayan bu aralıkta,  $i_{LR}$  akımı lineer olarak artar. Bu akımın  $I_i$ 'ye yükselmesiyle birlikte  $D_{RL}$  diyodu ZCS ve ZVS ile kesime girer. Bu aralık için,

$$i_{LR} = \frac{(V_o - V_i)}{L_R} (t - t_2) + I_{L2} \quad (5.6)$$





Şekil 5.2 ZCZVT PWM DC-DC dönüştürücünün eşdeğer çalışma aralıkları.

$$\Delta t_{23} = \left( \frac{I_{in} - I_{L_2}}{V_o - V_i} \right) L_R \quad (5.7)$$

bağıntıları elde edilir.

**Aralık 4** [  $t_3 < t < t_4$  : Şekil 5.2(d) ]

$t=t_3$  anında  $D_{RL}$ 'nin kesime girmesiyle,  $L_R$  ve  $C_{R2}$  arasında bir rezonans başlar.  $C_{R2}$  geriliminin sıfıra düşmesiyle bu aralık sona erer. Bu aralık için aşağıdaki bağıntılar yazılabilir.

$$i_{L_R} = \frac{(V_o - V_i)}{Z_2} \sin(\omega_2(t - t_3)) + I_{in} \quad (5.8)$$

$$v_{C_{R2}} = (v_o - V_i) \cos(\omega_2(t - t_3)) + V_i \quad (5.9)$$

$$\Delta t_{34} = \frac{1}{\omega_2} \cos^{-1} \left( \frac{-V_i}{V_o - V_i} \right) \quad (5.10)$$

Bu bağıntılarda aşağıdaki eşitlikler geçerlidir.

$$Z_2 = \sqrt{\frac{L_R}{C_{R2}}} \quad (5.11)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_R C_{R2}}} \quad (5.12)$$

**Aralık 5** [  $t_4 < t < t_5$  : Şekil 5.2(e) ]

$C_{R2}$  geriliminin sıfıra düşmesiyle  $D_S$  diyodu iletme girer.  $i_{L_R}$  akımı lineer olarak azalır ve  $I_i$ 'ye düştüğünde  $D_S$  diyodu kesime girer. Bu aralıkta,

$$i_{L_R} = -\frac{V_i}{L_R} (t - t_4) + I_{L_4} \quad (5.13)$$

$$\Delta t_{45} = \left( \frac{I_{L_4} - I_{in}}{V_i} \right) L_R \quad (5.14)$$

bağıntıları geçerlidir. Ana anahtarın ZVT ile iletme girmesi için  $D_S$  diyodunun iletimde

olduğu bu aralıkta S'nin kontrol sinyali uygulanmalıdır.

**Aralık 6** [  $t_5 < t < t_6$  : Şekil 5.2(f) ]

$t=t_5$  anında S'nin ZVT ile girmesiyle başlayan bu aralıkta,  $i_{L_R}$  akımı lineer olarak azalmaya devam eder. S'nin akımı ise yükselmeye başlar ve  $I_i$ 'ye ulaştığında  $i_{L_R}$  akımı sıfır olur ve bu aralık sona erer.

$$i_{L_R} = -\frac{V_i}{L_R}(t - t_5) + I_{in} \quad (5.15)$$

$$\Delta t_{56} = \frac{I_{in}}{V_i} L_R \quad (5.16)$$

**Aralık 7** [  $t_6 < t < t_7$  : Şekil 5.2(g) ]

Bu aralıkta  $L_R$  ve  $C_{R1}$  arasında  $C_{R1}$ - $L_R$ - $D_{A1}$ -S yolu ile bir rezonans başlar. Yarı rezonans periyodu sonunda  $C_{R1}$ 'in gerilimi yön değiştirir ve bu aralık sona erer.  $S_{A1}$ , dahili diyodu  $D_{A1}$ 'in iletimde olduğu bu aralıkta kontrol sinyali kesilmesiyle ZCT ile kesime girer. Bu aralık için aşağıdaki bağıntılar yazılabilir.

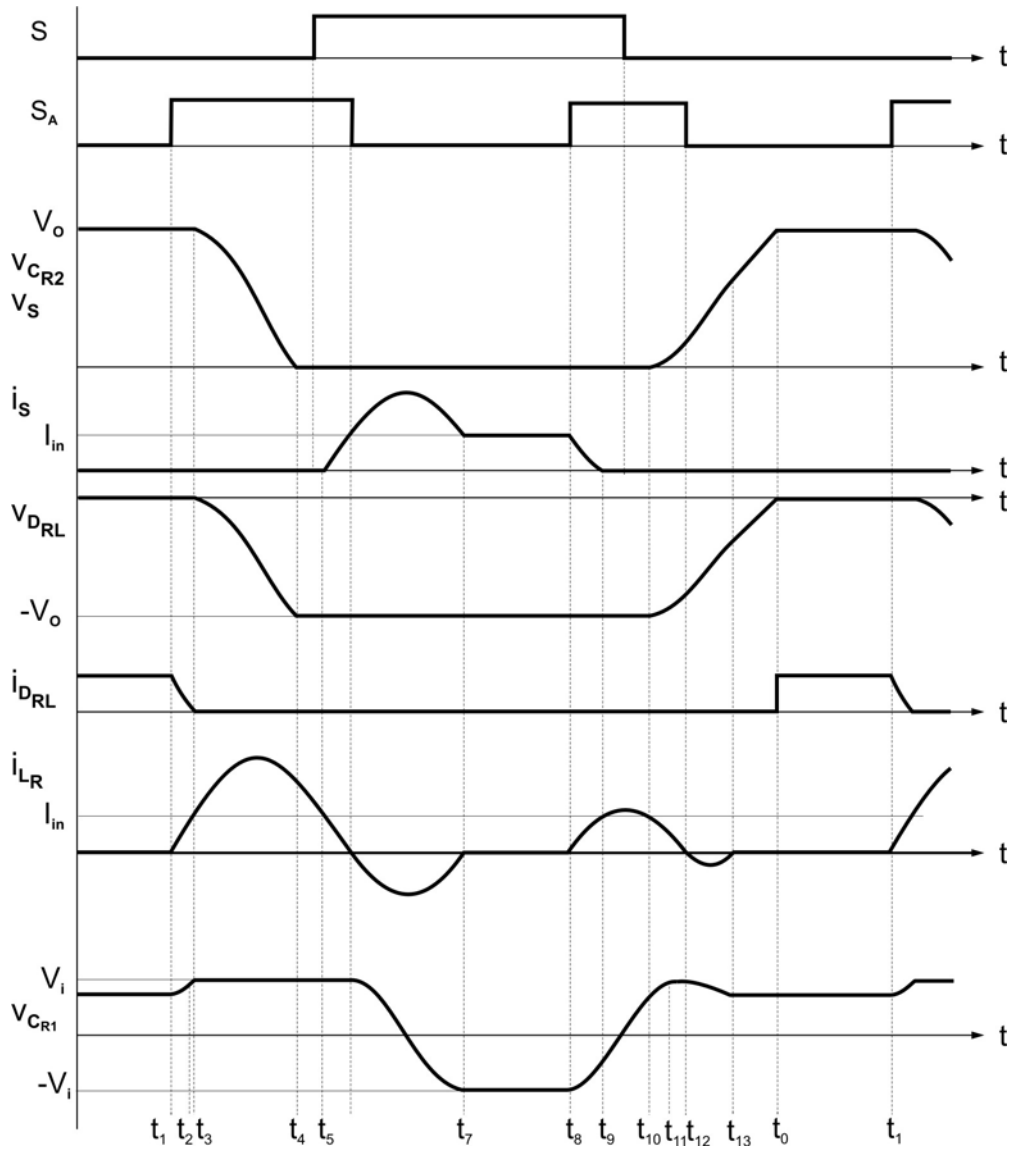
$$i_{L_R} = -\frac{V_i}{Z_1} \sin(\omega_1(t - t_6)) \quad (5.17)$$

$$v_{C_{R1}} = V_i \cos(\omega_1(t - t_6)) \quad (5.18)$$

$$\Delta t_{67} = \frac{\pi}{\omega_1} \quad (5.19)$$

**Aralık 8** [  $t_7 < t < t_8$  : Şekil 5.2(h) ]

Bu aralık boyunca, ana anahtar S giriş akımı  $I_i$ 'yi iletmeye devam eder. Bu kademe süresi, normal PWM dönüştürücünün iletim durumunun büyük bir kısmıdır ve PWM kontrolü tarafından belirlenir.



Şekil 5.3 ZCZVT dönüştürücünün temel dalga şekilleri.

**Aralık 9** [  $t_8 < t < t_9$  : Şekil 5.2(i) ]

$t=t_8$  anında  $S_A$ 'nın kontrol sinyalinin uygulanmasıyla birlikte bu aralık başlar.  $L_R$  ve  $C_{R1}$  arasında bir rezonans başlar.  $i_{LR}$  akımı sinüsoidal olarak artarken ana anahtardan geçen akım azalmaya başlar. Ana anahtar akımının sıfır olmasıyla  $D_S$  diyodu iletme girer ve bu aralık sona erer. Bu aralıkta,

$$i_{LR} = \frac{V_i}{Z_1} \sin(\omega_1(t - t_8)) \quad (5.20)$$

$$v_{C_{R1}} = -V_i \cos(\omega_1(t - t_8)) \quad (5.21)$$

$$\Delta t_{89} = \frac{1}{\omega_1} \sin^{-1}\left(\frac{Z_1 I_{in}}{V_i}\right) \quad (5.22)$$

eşitlikleri geçerlidir.

**Aralık 10** [  $t_9 < t < t_{10}$  : Şekil 5.2(j) ]

$D_S$  diyodunun iletimde olduğu bu aralıkta  $S$ 'nin kontrol sinyali kesilir ve böylece ZCT ile kesime girmesi sağlanır.  $i_{L_R}$  akımının tekrar  $I_i$ 'ye düşmesiyle  $D_S$  diyodu kesime girer. Bu aralıkta aşağıdaki bağıntılar geçerlidir.

$$i_{L_R} = -\frac{V_{C_{19}}}{Z_1} \sin(\omega_1(t - t_9)) + I_{in} \cos(\omega_1(t - t_9)) \quad (5.23)$$

$$v_{C_{R1}} = V_{C_{19}} \cos(\omega_1(t - t_9)) + Z_1 I_{in} \sin(\omega_1(t - t_9)) \quad (5.24)$$

$$\Delta t_{910} = \frac{1}{\omega_1} \cos^{-1}\left(\frac{2(Z_1 I_{in})^2 - V_i^2}{V_i^2}\right) \quad (5.25)$$

**Aralık 11** [  $t_{10} < t < t_{11}$  : Şekil 5.2(k) ]

$t=t_{10}$ 'da  $D_S$  diyodunun kesime girmesiyle  $L_R$ - $C_{R1}$ - $C_{R2}$  arasında bir rezonans başlar.  $C_{R2}$  rezonans kondansatörünün gerilimi artmaya başlar. Aynı zamanda  $C_{R1}$  gerilimi de artar ve  $V_i$ 'ye ulaştığında  $D_{A2}$  diyodu iletime girer ve bu aralık sona erer. Bu aralıkta,

$$i_{L_R} = -\frac{V_{C_{10}}}{Z_e} \sin(\omega_e(t - t_{10})) + \frac{C_e}{C_{R1}} I_{in} \cos(\omega_e(t - t_7)) + \frac{C_e}{C_{R2}} I_{in} \quad (5.26)$$

$$v_{C_{R1}} = \frac{C_e}{C_{R1}} \left[ V_{C_{10}} \cos(\omega_e(t - t_{10})) + \frac{I_{in}}{C_{R1} \omega_e} \sin(\omega_e(t - t_{10})) \right] + \frac{C_{R1} V_{C_{10}} + I_{in} t}{C_{R1} + C_{R2}} \quad (5.27)$$

$$v_{C_{R2}} = -\frac{C_e}{C_{R2}} \left[ V_{C_{10}} \cos(\omega_e(t - t_{10})) + \frac{I_{in}}{C_{R1} \omega_e} \sin(\omega_e(t - t_{10})) \right] + \frac{C_{R1} V_{C_{10}} + I_{in} t}{C_{R1} + C_{R2}} \quad (5.28)$$

$$\Delta t_{1011} = \frac{C_{R2} V_{C211} + C_{R1} (V_i - V_{C110})}{I_{in}} \quad (5.29)$$

bağıntıları geçerlidir. Bu bağıntılarda,

$$C_e = \frac{C_{R1} C_{R2}}{C_{R1} + C_{R2}} \quad (5.30)$$

$$Z_e = \sqrt{\frac{L_R}{C_e}} \quad (5.31)$$

$$\omega_e = \frac{1}{\sqrt{L_R C_e}} \quad (5.32)$$

eşitlikler geçerlidir.

**Aralık 12** [  $t_{11} < t < t_{12}$  : Şekil 5.2(l) ]

$D_{A2}$  diyodunun iletme girmesiyle  $L_R$  ve  $C_{R2}$  arasında bir rezonans oluşur.  $C_{R2}$ 'nin gerilimi artmaya devam eder.  $i_{LR}$  akımının sıfır olmasıyla  $D_{A2}$  kesime ve  $D_{A1}$  iletme girer. Bu aralık için aşağıdaki bağıntılar yazılabilir.

$$i_{LR} = \frac{(V_{C211} - V_i)}{Z_2} \sin(\omega_2(t - t_{11})) - (I_{in} - I_{L11}) \cos(\omega_2(t - t_{11})) + I_{in} \quad (5.33)$$

$$v_{C_{R2}} = (V_{C211} - V_i) \cos(\omega_2(t - t_{11})) + Z_2 (I_{in} - I_{L11}) \sin(\omega_2(t - t_{11})) + V_i \quad (5.34)$$

$$\Delta t_{1112} = \frac{2}{\omega_2} \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{V_{C211} - V_i}{Z_2 (I_{L11} - 2I_{in})} - \sqrt{\left( \frac{V_{C211} - V_i}{Z_2 (I_{L11} - 2I_{in})} \right)^2 + \frac{I_{L11}}{I_{L11} - 2I_{in}}} \right) \quad (5.35)$$

**Aralık 13** [  $t_{12} < t < t_{13}$  : Şekil 5.2(m) ]

$t=t_{12}$ 'de  $C_{R1}$ - $L_R$ - $C_{R2}$  arasında bir rezonans başlar ve  $i_{LR}$  akımı negatif olarak artar.  $i_{LR}$  akımının tekrar sıfır olmasıyla  $D_{A1}$  kesime girer.  $D_{A1}$ 'in iletme olduğu bu aralıkta  $S_{A1}$ 'in kontrol sinyali kesilerek ZCT ile kesime girmesi sağlanır. Bu aralık için,

$$i_{L_R} = \frac{-(V_i - V_{C_{212}})}{Z_e} \sin(\omega_e(t - t_{12})) + \frac{C_e}{C_{R2}} I_{in} (1 - \cos(\omega_e(t - t_{12}))) \quad (5.36)$$

$$v_{C_{R1}} = \frac{C_e}{C_{R1}} \left[ (V_i - V_{C_{212}}) \cos(\omega_e(t - t_{12})) + \frac{I_{in}}{C_{R2}\omega_e} \sin(\omega_e(t - t_{12})) \right] + \frac{C_{R1}V_i + C_{R1}V_{C_{110}} + I_{in}t}{C_{R1} + C_{R2}} \quad (5.37)$$

$$v_{C_{R2}} = -\frac{C_e}{C_{R2}} \left[ (V_i - V_{C_{212}}) \cos(\omega_e(t - t_{12})) - \frac{I_{in}}{C_{R2}\omega_e} \sin(\omega_e(t - t_{12})) \right] + \frac{C_{R1}V_i + C_{R1}V_{C_{110}} + I_{in}t}{C_{R1} + C_{R2}} \quad (5.38)$$

$$\Delta t_{1213} = \frac{C_{R2}(V_{C_{213}} - V_{C_{212}}) + C_{R1}(V_{C_{113}} - V_i)}{I_{in}} \quad (5.39)$$

bağıntılarını geçerlidir.

**Aralık 14** [  $t_{13} < t < t_{14} = t_0$ : Şekil 5.2(n) ]

Bu aralık boyunca  $C_{R2}$  rezonans kondansatörü  $I_i$  giriş akımı ile şarj olur ve gerilimi lineer olarak artar.  $V_i$ 'ye ulaştığında  $D_{RL}$  diyodu iletme girer ve bu aralık sona erer. Bu aralıkta,

$$v_{C_{R2}} = V_{C_{213}} + \frac{I_{in}}{C_{R2}}(t - t_{13}) \quad (5.40)$$

$$\Delta t_{1314} = \left( \frac{V_o - V_{C_{213}}}{I_{in}} \right) C_{R2} \quad (5.41)$$

bağıntılarını elde edilir.

Böylece,  $t = t_{14} = t_0$  anında, bir anahtarlama periyodu tamamlanır ve başka bir anahtarlama periyodu başlar.

Çizelge 5.1 Devrede kullanılan aktif ve pasif yarı iletken elemanların anahtarlama durumları ve maruz kaldıkları maksimum gerilim ve akım değerleri.

Eleman	İletime Girme	Kesime Girme	Elemanların Maruz Kaldığı	
			Maksimum Gerilim	Maksimum Akım
S	ZVT(ZCS, ZVS)	ZCT(ZCS, ZVS)	$V_o$	$\frac{V_i}{Z_r} + I_{in}$
$S_A$	ZCS	ZCT(ZCS, ZVS)	$V_o - V_{C113}$	$\frac{V_o - V_i}{L_r} + I_{in}$
$D_{RL}$	ZVS	ZCS, ZVS	$V_o$	$I_i$

#### 5.4 Sonuç

Bu bölümde, (ZCZVT) bastırma hücresinin kullanıldığı PWM DC-DC dönüştürücü incelenmiştir. Bu hücre, ZVT ve ZCT tekniklerinin iyi yönlerinin birleştirilmesi düşüncesi ile ortaya çıkmıştır. Temel prensibi, ana anahtarın ilettime girmeden önce uçlarındaki gerilimin sıfıra düşürülerek sıfırda tutulması ve kesime girmeden öncede içinden geçen akımın sıfıra düşürülerek sıfırda tutulmasıdır. Böylece, ana anahtar için ZVT ile ilettime girme ve ZCT ile kesime girme işlemi birlikte sağlanmaktadır. Ayrıca yardımcı anahtarın kesime girme işlemi de yumuşak anahtarlama ile sağlanmaktadır. Devrenin başlıca mahsurları aşağıda sıralanmıştır.

1. Devrenin çalışabilmesi için giriş geriliminin çıkış geriliminin yarısından küçük olması gerekmektedir.
2. Ana elemanda ek akım stresi oluşmaktadır.
3. Bir anahtarlamaadaki dört yarı rezonans nedeniyle sirkülasyon enerjisi yüksektir. Bundan dolayı aşırı kayıpların oluşması söz konusudur.





### 6.3 Çalışma Aralıkları

Sunulan ZVT-ZCT-PWM dönüştürücünün bir anahtarlama periyodu içerisindeki kararlı durum çalışmasında on iki aralık oluşur. Bu aralıkların eşdeğer devre şemaları sırasıyla Şekil 6.2(a)-(l)'de verilmiştir. Bu aralıklarla ilgili temel dalga şekilleri Şekil 6.3'te görülmektedir. Aşağıda sırasıyla bütün çalışma aralıklarının detaylı analizi sunulmuştur.

#### Aralık 1 [ $t_0 < t < t_1$ : Şekil 6.2(a) ]

Bu aralık başında, ana transistör  $T_1$  ve yardımcı transistör  $T_2$  kesimdedir. Ana diyot  $D_F$  iletimdedir ve giriş akımı  $I_i$ 'yi geçirmektedir.  $t=t_0$  anında,  $i_{T1}=0$ ,  $i_{T2}=0$ ,  $i_{DF}=I_i$ ,  $i_{Lsa}=0$ ,  $i_{Lsb}=0$  ve  $v_{Cs}=0$  eşitlikleri mevcuttur.  $t=t_0$ 'da  $T_2$  yardımcı transistörünün kapısına kontrol sinyalinin uygulanmasıyla başlayan bu aralıkta, üst ve alt bastırma endüktansları  $L_{sa}$  ve  $L_{sb}$  ile bastırma kondansatörü  $C_s$  arasında bir rezonans başlar. Eşzamanlı olarak  $T_2$  akımı artar ve  $D_F$  akımı azalır. Seri bağlı bastırma endüktanslarından dolayı  $T_2$  ve  $D_3$  yaklaşık ZCS ile ilettime girer. Bu aralık için,

$$i_{Lsa} = i_{D3} = \frac{V_o}{L_s}(t - t_0) - \frac{V_o}{\omega_e L_s} \sin(\omega_e(t - t_0)) \quad (6.1)$$

$$i_{Lsb} = i_{T2} = \frac{V_o}{L_s}(t - t_0) + \frac{V_o}{\omega_e L_s L_{sb}} \sin(\omega_e(t - t_0)) \quad (6.2)$$

$$v_{Cs} = V_o \frac{L_{sa}}{L_s} (1 - \cos(\omega_e(t - t_0))) \quad (6.3)$$

bağıntıları elde edilir. Bu bağıntılarda,

$$L_s = L_{sa} + L_{sb} \quad (6.4)$$

$$L_e = \frac{L_{sa} L_{sb}}{L_{sa} + L_{sb}} \quad (6.5)$$

$$Z_e = \sqrt{\frac{L_e}{C_s}} \quad (6.6)$$

$$\omega_e = \sqrt{\frac{1}{L_e C_s}} \quad (6.7)$$

eşitlikleri geçerlidir. Bu aralıkta, önce  $t=t_1$  anında,  $T_2$  akımı  $I_i$ 'ye erişir ve  $D_F$  akımı sıfıra düşer.  $D_F$  diyodunun yaklaşık ZCS ile kesime girmesiyle bu aralık sona erer. Aralığın sonunda,

$$i_{Lsa}=I_{Lsa1}$$

$$i_{Lsb}=I_{Lsb1}=I_i$$

$$v_{Cs}=V_{Cs1}$$

eşitlikleri geçerlidir.

### Aralık 2 [ $t_1 < t < t_2$ : Şekil 6.2(b) ]

Bu kademe başında,  $i_{T1}=0$ ,  $i_{T2}=I_i$ ,  $i_{DF}=0$ ,  $i_{Lsa}=I_{Lsa1}$ ,  $i_{Lsb}=I_i$ ,  $v_{Cs}=V_{Cs1}$  ve  $v_{Cp}=V_o$  'dır. Ana transistör  $T_1$  ve ana diyot  $D_F$  kesimdedir. Yardımcı transistör  $T_2$  iletimdedir ve  $I_i$  akımını geçirmektedir.

$t=t_1$  anında,  $C_p$ - $L_{sa}$ - $L_{sb}$ - $C_s$  arasında bir rezonans başlar. Bu aralık için, aşağıdaki durum denklemleri yazılabilir.

$$L_{sa} \frac{di_{Lsa}}{dt} = v_{Cs} \quad (6.8)$$

$$L_{sb} \frac{di_{Lsb}}{dt} = v_{Cp} - v_{Cs} \quad (6.9)$$

$$C_s \frac{dv_{Cs}}{dt} = i_{Lsb} - i_{Lsa} \quad (6.10)$$

$$C_p \frac{dv_{Cp}}{dt} = I_i - i_{Lsb} \quad (6.11)$$

$t=t_2$ 'de,  $C_p$  kondansatöründe depolanan enerji tamamen rezonans devresine aktarılır ve  $v_{Cp}$  gerilimi 0 olur.  $v_{Cp}$  geriliminin 0 olmasıyla birlikte  $D_1$  diyodu yaklaşık ZVS ile ilettime girer ve bu aralık sona erer.

Burada şunu belirtmek gerekir ki,  $C_p$  kondansatörü  $S_1$ 'in parazitik kondansatörü ile ona katılan diğer parazitik kapasitansların toplamı olarak kabul edilebilir ve bu devrede ilave bir  $C_p$  kondansatörüne gerek yoktur.

Aralığın sonunda,

$$i_{Lsa}=I_{Lsa2}$$

$$i_{Lsb}=I_{Lsb2}$$

$$v_{Cs}=V_{Cs2}$$

eşitlikleri geçerlidir.

**Aralık 3** [  $t_2 < t < t_5$  : Şekil 6.2(c) ]

$t=t_2$ 'de  $D_1$ 'in iletme girmesiyle başlayan bu aralığın başında,  $i_{T1}=0$ ,  $i_{T2}=I_{Lsb2}$ ,  $i_{DF}=0$ ,  $i_{Lsa}=I_{Lsa2}$ ,  $i_{Lsb}=I_{Lsb2}$ ,  $v_{Cs}=V_{Cs2}$  ve  $v_{Cp}=0$  eşitlikleri mevcuttur. Üst ve alt bastırma endüktansları  $L_{sa}$  ve  $L_{sb}$  ile bastırma kondansatörü  $C_s$  arasındaki rezonans devam eder. Bu aralık için,

$$\begin{aligned} i_{Lsa} = & \frac{L_e}{L_{sa}} I_{Lsb2} (1 - \cos(\omega_e (t - t_2))) + \frac{L_e}{L_{sb}} I_{Lsa2} (1 - \cos(\omega_e (t - t_2))) \\ & + I_{Lsa2} \cos(\omega_e (t - t_2)) - \frac{V_{Cs2}}{\omega_e L_{sa}} \sin(\omega_e (t - t_2)) \end{aligned} \quad (6.12)$$

$$\begin{aligned} i_{Lsb} = & \frac{L_e}{L_{sa}} I_{Lsb2} (1 - \cos(\omega_e (t - t_2))) + \frac{L_e}{L_{sb}} I_{Lsa2} (1 - \cos(\omega_e (t - t_2))) \\ & + I_{Lsb2} \cos(\omega_e (t - t_2)) - \frac{V_{Cs2}}{\omega_e L_{sb}} \sin(\omega_e (t - t_2)) \end{aligned} \quad (6.13)$$

$$v_{Cs} = V_{Cs2} \cos(\omega_e (t - t_2)) + Z_e (I_{Lsb2} - I_{Lsa3}) \sin(\omega_e (t - t_2)) \quad (6.14)$$

bağıntıları yazılabilir. Burada,

$$Z_e = \sqrt{\frac{L_e}{C_s}} \quad (6.15)$$

$$\omega_e = \sqrt{\frac{1}{L_e C_s}} \quad (6.16)$$

eşitlikleri geçerlidir.



Bu aralıkta üç farklı çalışma durumu oluşur.  $C_p$  kondansatörü geriliminin 0 olmasıyla,  $D_1$  diyodu iletme girer ve  $i_{Lsb}$  yardımcı anahtar akımının  $I_i$  giriş akımının üstünde kalan kısmını geçirir.  $D_1$ 'in iletimde olduğu bu aralık ana transistör  $T_1$ 'in sıfır gerilimde geçiş (ZVT) ile iletme girmesini sağlar ve bu nedenle bu aralığa ZVT süresi denilir.  $D_1$  iletimde iken  $T_1$ 'in kapısına iletim sinyali uygulanır.  $t=t_3$  anında  $i_{Lsb}$  alt endüktans akımı  $I_i$  giriş akımı seviyesine düştüğünde  $D_1$  diyodu kesime girer.  $D_1$ 'in kesime girmesiyle birlikte  $T_1$  ana transistörü ZVT ile iletme girer. Ana transistor  $T_1$ 'in iletme girmesiyle akımı artmaya başlar ve bu akım  $t=t_4$ 'te giriş akımı  $I_i$ 'ye ulaştığında alt endüktans akımı sıfır olur. Yardımcı transistör  $T_2$  akımının sıfıra düşmesiyle  $T_2$  kesime ve  $D_2$  iletme girer.  $D_2$  diyodunun iletimde olduğu bu aralıkta  $T_2$  yardımcı transistorünün kontrol sinyali kesilir, böylece  $T_2$  yardımcı anahtarı ZCT ile kesime girer.  $t=t_5$ 'te içinden geçen akımın tekrar sıfır olmasıyla  $D_2$  diyodu da kesime girer ve bu aralık sona erer.

**Aralık 4** [  $t_5 < t < t_6$  : Şekil 6.2(d) ]

Kademe başında,  $i_{T1}=I_i$ ,  $i_{T2}=0$ ,  $i_{DF}=0$ ,  $i_{Lsa}=I_{Lsa5}$ ,  $i_{Lsb}=0$ ,  $v_{Cs}=V_{Cs5}$  ve  $v_{Cp}=0$  eşitlikleri mevcuttur.  $t=t_5$  anında  $D_2$  diyodunun kesime girmesiyle başlayan bu aralıkta, ana anahtar  $T_1$  giriş akımını geçirirken, üst bastırma endüktansı  $L_{sa}$  ve bastırma kondansatörü  $C_s$  arasında  $L_{sa}$ - $C_s$ - $D_3$  yolu ile bir seri rezonans oluşur. Bu aralık için aşağıdaki eşitlikler çıkartılır.

$$i_{Lsa} = I_{Lsa5} \cos(\omega_1(t - t_5)) \quad (6.17)$$

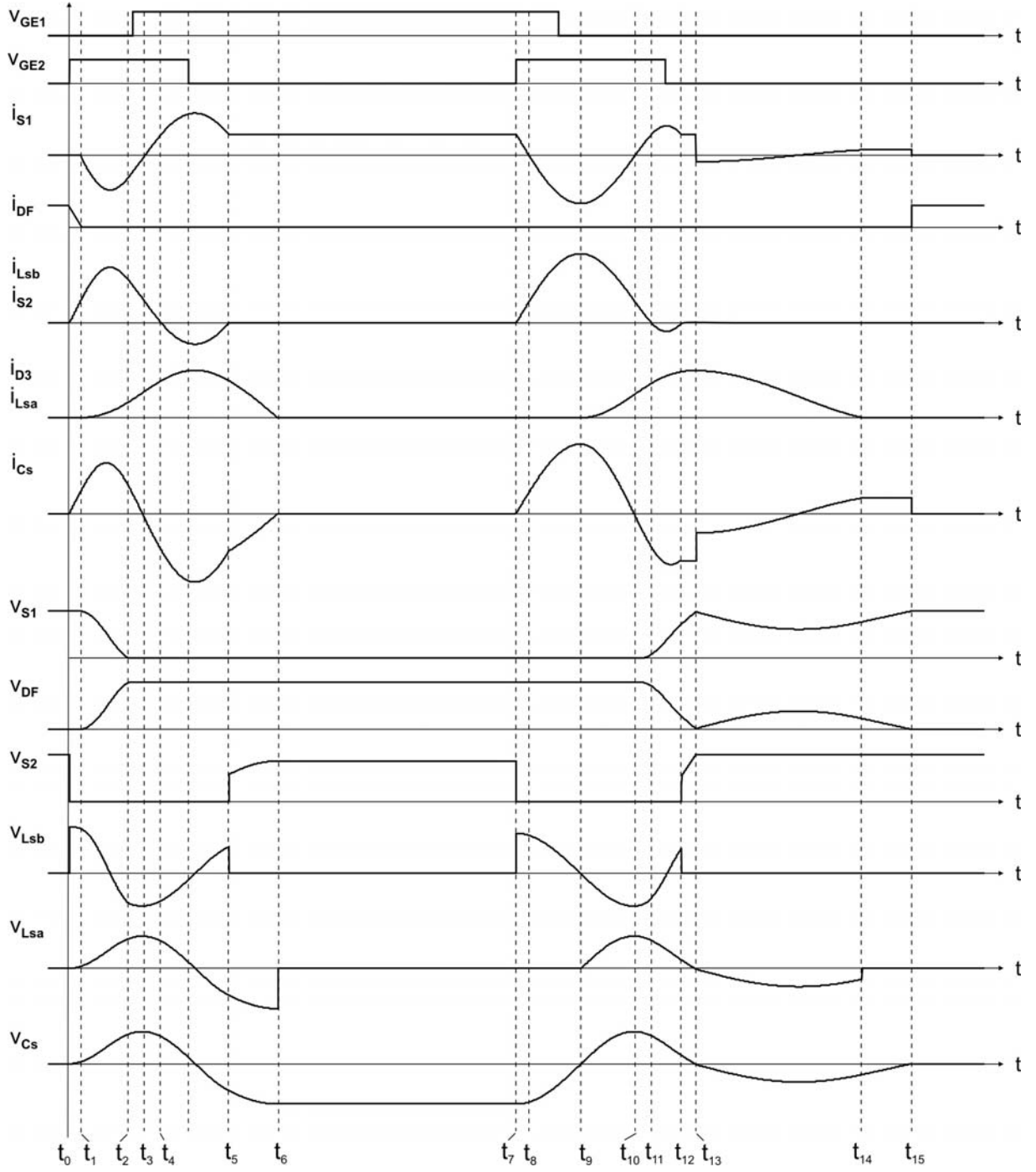
$$v_{Cs} = Z_1 I_{Lsa5} \sin(\omega_1(t - t_5)) \quad (6.18)$$

$L_{sa}$  üst endüktansında biriken enerji bu rezonans ile  $C_s$  bastırma kondansatörüne aktarılır. Yukarıdaki denklemlerde,

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L_{sa}}{C_s}} \quad (6.19)$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{L_{sa} C_s}} \quad (6.20)$$

eşitlikleri geçerlidir.



Şekil 6.3 Sunulan dönüştürücüye ait temel dalga şekilleri.

$t=t_6$  anında,  $i_{Lsa}$  akımının sıfır ve  $v_{Cs}$  geriliminin maksimum olmasıyla bu aralık sona erer.  $v_{Cs}$  geriliminin maksimum değeri,

$$V_{Cs\max} = Z_1 I_{Lsa5} \quad (6.21)$$

şeklinde yazılabilir.

**Aralık 5** [  $t_6 < t < t_7$  : Şekil 6.2(e) ]

Bu aralık boyunca ana transistör  $T_1$  giriş akımı  $I_i$ 'yi iletmeye devam eder ve bu aralıkta bastırma devresi aktif değildir. Bu aralık süresi normal PWM dönüştürücünün anahtarın iletim aralığının büyük bir kısmıdır ve PWM kontrolü tarafından belirlenir. Bu aralıkta,

$$i_{T1} = I_i \quad (6.22)$$

eşitliği geçerlidir.

**Aralık 6** [  $t_7 < t < t_9$  : Şekil 6.2(f) ]

Bu aralığın başında,  $i_{T1} = I_i$ ,  $i_{T2} = 0$ ,  $i_{DF} = 0$ ,  $i_{Lsa} = 0$ ,  $i_{Lsb} = 0$ ,  $v_{Cs} = v_{Cs7} = v_{Csmax}$  ve  $v_{Cp} = 0$  eşitlikleri geçerlidir.  $t = t_7$  anında,  $T_2$  yardımcı transistörünün kapısına iletim sinyalinin uygulanmasıyla, bastırma kondansatörü  $C_s$  ve alt bastırma endüktansı  $L_{sb}$  arasında  $C_s$ - $L_{sb}$ - $T_2$ - $T_1$  yolu ile yeni bir rezonans başlar. Bu aralık için,

$$i_{Lsb} = i_{T2} = \frac{V_{Csmax}}{Z_2} \sin(\omega_2(t - t_7)) \quad (6.23)$$

$$v_{Cs} = V_{Csmax} \cos(\omega_2(t - t_7)) \quad (6.24)$$

bağıntıları elde edilir. Bu bağıntılarda,

$$Z_2 = \sqrt{\frac{L_{sb}}{C_s}} \quad (6.25)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{1}{L_{sb} C_s}} \quad (6.26)$$

eşitlikleri geçerlidir. Burada, yardımcı transistör  $T_2$ , alt bastırma endüktansı  $L_{sb}$  üzerinden ZCS ile iletme girer. Oluşan rezonans ile eşzamanlı olarak  $T_2$ 'nin akımı artar ve  $T_1$ 'in akımı azalır.  $t = t_8$  anında yardımcı transistör akımının  $I_i$ 'ye ulaşmasıyla  $T_1$  akımı sıfıra düşer.  $T_1$  akımının sıfır olmasıyla birlikte  $D_1$  diyodu iletme girer.  $D_1$ 'in iletimde olduğu bu aralık, ana



transistör  $T_1$ 'in sıfır akımda geçiş (ZCT) ile kesime girmesini sağlar ve bu nedenle bu aralığa ZCT süresi denilir.  $D_1$  iletimde iken  $T_1$ 'in kapısına uygulanan kontrol sinyali kesilir. Bastırma kondansatörü  $C_s$  ve alt bastırma endüktansı  $L_{sb}$  arasındaki rezonans  $C_s$ - $L_{sb}$ - $T_2$ - $D_1$  yolu ile devam eder.  $D_1$  diyodu  $i_{Lsb}$  akımının giriş akımı  $I_i$ 'den fazla olan kısmını geçirir.  $t=t_9$ 'da  $v_{Cs}$  geriliminin sıfır olması ve  $i_{Lsb}$  akımının maksimum değerine ulaşmasıyla bu aralık sona erer.  $i_{Lsb}$  akımının maksimum değeri için,

$$I_{Lsb\max} = \frac{V_{Cs\max}}{Z_2} \quad (6.27)$$

ifadesi yazılabilir.

#### Aralık 7 [ $t_9 < t < t_{10}$ : Şekil 6.2(g) ]

$v_{Cs}$  bastırma kondansatörü gerilimi  $t=t_9$  anında pozitif olmaya başladığında  $D_3$  diyodu iletime girer ve bu aralık başlar.  $t=t_9$  anında,  $i_{T1}=0$ ,  $i_{T2}=I_{Lsb\max}$ ,  $i_{DF}=0$ ,  $i_{Lsa}=0$ ,  $i_{Lsb}=I_{Lsb\max}$ ,  $v_{Cs}=0$  ve  $v_{Cp}=0$  eşitlikleri geçerlidir. Alt bastırma endüktansı  $L_{sb}$ , üst bastırma endüktansı  $L_{sa}$  ve bastırma kondansatörü  $C_s$  arasında bir rezonans oluşur. Bu aralıkta aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$i_{Lsa} = \frac{L_e}{L_{sa}} I_{Lsb\max} (1 - \cos(\omega_e(t - t_9))) \quad (6.28)$$

$$i_{Lsb} = \frac{L_e}{L_{sa}} I_{Lsb\max} (1 - \cos(\omega_e(t - t_9))) + I_{Lsb\max} (1 - \cos(\omega_e(t - t_9))) \quad (6.29)$$

$$v_{Cs} = \frac{I_{Lsb\max}}{\omega_e C_s} \sin(\omega_e(t - t_9)) \quad (6.30)$$

Alt bastırma endüktansı  $L_{sb}$  akımı  $i_{Lsb}$ 'nin  $I_i$ 'ye düşmesiyle birlikte  $D_1$  diyodunun akımı sıfır olur.  $t=t_{10}$  anında  $D_1$  diyodu kesime girer ve bu aralık sona erer.

#### Aralık 8 [ $t_{10} < t < t_{12}$ : Şekil 6.2(h) ]

$t=t_{10}$  anında,  $i_{T1}=0$ ,  $i_{T2}=I_i$ ,  $i_{DF}=0$ ,  $i_{Lsa}=I_{Lsa10}$ ,  $i_{Lsb}=I_i$ ,  $v_{Cs}=V_{Cs10}$  ve  $v_{Cp}=0$  eşitlikleri geçerlidir. Alt bastırma endüktans akımı  $i_{Lsb}$ 'nin  $I_i$ 'ye düşmesiyle başlayan bu aralıkta  $C_p$ - $L_{sa}$ - $L_{sb}$ - $C_s$  arasında sabit akım kaynağı altında bir rezonans oluşur. Bu aralık için,

$$L_{sa} \frac{di_{Lsa}}{dt} = v_{Cs} \quad (6.31)$$

$$L_{sb} \frac{di_{Lsb}}{dt} = v_{Cp} - v_{Cs} \quad (6.32)$$

$$C_s \frac{dv_{Cs}}{dt} = i_{Lsb} - i_{Lsa} \quad (6.33)$$

$$C_p \frac{dv_{Cp}}{dt} = I_i - i_{Lsb} \quad (6.34)$$

durum denklemleri yazılabilir. Oluşan rezonans ile alt bastırma endüktans akımı  $i_{Lsb}$  azalmaya devam eder.  $t=t_{11}$  anında alt bastırma endüktans akımının sıfır olmasıyla yardımcı transistör  $T_2$  kesime ve  $D_2$  diyodu ilettime girer.  $D_2$  diyodunun iletimde olduğu bu aralıkta  $T_2$  yardımcı transistorünün kontrol sinyali kesilir, böylece  $T_2$  yardımcı transistörü ZCT ile kesime girer.  $t=t_{12}$ 'de içinden geçen akımın sıfır olmasıyla  $D_2$  diyodu kesime girer ve bu aralık sona erer.

#### Aralık 9 [ $t_{12} < t < t_{13}$ : Şekil 6.2(i) ]

Bu aralığın başlangıcında  $i_{T1}=0$ ,  $i_{T2}=0$ ,  $i_{DF}=0$ ,  $i_{Lsa}=I_{Lsa12}$ ,  $i_{Lsb}=0$ ,  $v_{Cs}=V_{Cs12}$  ve  $v_{Cp}=V_{Cp12}$  eşitlikleri geçerlidir. Bu aralıkta iki farklı kapalı devre oluşur. Bir devrede  $C_p$  kondansatörü giriş akımı  $I_i$  ile lineer olarak şarj olur. Diğer devrede  $L_{sa}$  ve  $C_s$  arasında  $L_{sa}$ - $C_s$ - $D_3$  yolu ile bir rezonans oluşur. Bu aralık için aşağıdaki eşitlikler çıkarılır.

$$i_{Lsa} = I_{Lsa12} \cos(\omega_1(t - t_{12})) \quad (6.35)$$

$$v_{Cs} = Z_1 I_{Lsa12} \sin(\omega_1(t - t_{12})) - \frac{I_i}{C_s}(t - t_{12}) \quad (6.36)$$

$$v_{Cp} = \frac{I_i}{C_p}(t - t_{12}) \quad (6.37)$$

$t=t_{13}$ 'te  $v_{Cp}$  ve  $v_{Cs}$  gerilimlerinin toplamı çıkış gerilimi  $V_o$ 'a eşit olduğunda  $D_4$  diyodu ilettime girer ve bu aralık sona erer.

**Aralık 10** [  $t_{13} < t < t_{14}$  : Şekil 6.2(j) ]

$D_4$  diyodunun iletme girmesiyle başlayan bu aralığın başında  $i_{T1}=0$ ,  $i_{T2}=0$ ,  $i_{DF}=0$ ,  $i_{Lsa}=I_{Lsa13}$ ,  $i_{Lsb}=0$ ,  $v_{Cs}=V_{Cs13}$  ve  $v_{Cp}=V_o-V_{Cs13}$  eşitlikleri geçerlidir. Bu aralıkta üst bastırma endüktansı  $L_{sa}$ , parazitik kondansatörü  $C_p$  ve bastırma kondansatörü  $C_s$  arasında  $I_i$  giriş akımı altında rezonans oluşur.  $t=t_{14}$  anında,  $i_{Lsa}$  akımı 0 olur ve bu kademe sona erer. Aralık sonunda, bobinde depo edilen enerji tamamen kapasitelere ve yüke aktarılır. Bu aralık için aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$i_{Ls} = (I_{Ls13} - I_i) \cos(\omega_3(t - t_{13})) - \frac{V_{Cs13}}{Z_3} \sin(\omega_3(t - t_{13})) + I_i \quad (6.38)$$

$$v_{Cs} = V_o - v_{Cp} = V_{Cs13} \cos(\omega_3(t - t_{13})) + Z_3(I_{Ls13} - I_i) \sin(\omega_3(t - t_{13})) \quad (6.39)$$

Bu eşitliklerde;

$$C_3 = C_p + C_s \quad (6.40)$$

$$\omega_3 = \frac{1}{\sqrt{L_s C_3}} \quad (6.41)$$

$$Z_3 = \sqrt{\frac{L_s}{C_3}} \quad (6.42)$$

bağıntıları geçerlidir.

**Aralık 11** [  $t_{14} < t < t_{15}$  : Şekil 6.2(k) ]

$t=t_{14}$  anında  $i_{T1}=0$ ,  $i_{T2}=0$ ,  $i_{DF}=0$ ,  $i_{Lsa}=0$ ,  $i_{Lsb}=0$ ,  $v_{Cs}=V_{Cs14}$  ve  $v_{Cp}=V_o-V_{Cs14}$  eşitlikleri geçerlidir. Bu aralıkta sabit giriş akımı  $I_i$  altında lineer olarak  $C_p$  parazitik kondansatörü şarj olur ve  $C_s$  bastırma kondansatörü ise deşarj olur. Bu kademe için,

$$v_{Cs} = V_{Cs14} - \frac{I_i}{C_3}(t - t_{14}) \quad (6.43)$$

yazılabilir.  $t=t_{15}$  anında  $C_p$  kondansatörünün gerilimi çıkış gerilimi  $V_o$ 'a ulaştığında  $C_s$  kondansatörünün gerilimi 0'a düşer ve  $D_F$  diyodu iletme girer.  $D_F$  diyonun ZVS altında iletme girmesiyle bu aralık sona erer.

**Aralık 12** [  $t_{15} < t < t_{16}$  : Şekil 6.2(l) ]

Bu kademe boyunca, ana diyot  $D_F$  giriş akımı  $I_i$ 'yi iletmeye devam eder ve bastırma devresi aktif değildir. Bu kademe süresi, normal PWM dönüştürücünün kesim aralığının büyük bir kısmıdır ve PWM kontrolü tarafından belirlenir. Bu kademe için,

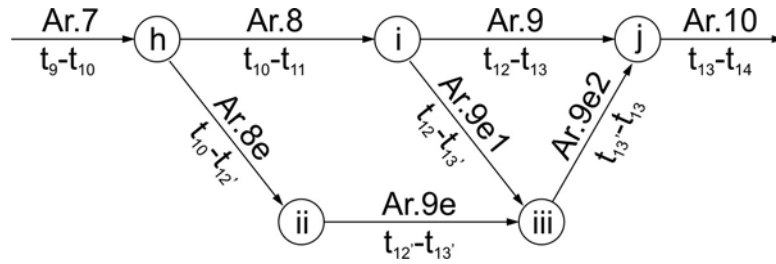
$$i_{DF} = I_i \quad (6.44)$$

yazılabilir.

Böylece,  $t = t_{16} = t_0$  anında, bir anahtarlama periyodu tamamlanır ve başka bir anahtarlama periyodu başlar.

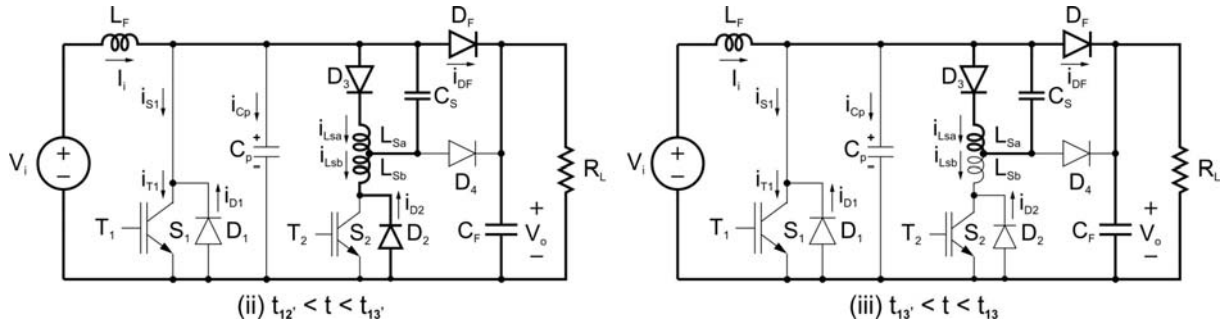
#### 6.4 Ek Çalışma Aralıkları

Ağırlıklı olarak eşdeğer parazitik kondansatörünün değerine bağlı olmak üzere, Aralık 8 veya Aralık 9 sonrası ek olarak aralık veya aralıklar oluşabilmektedir. Bu durum Şekil 6.4'te verilen şemada görülmektedir. Buna göre, (h) eşdeğer devresinden sonra sadece 2 veya (i) devresinden sonra sadece 1 ek devre oluşabilmekte, çalışma (j) ve daha sonraki eşdeğer devrelerle aynen sürmekte, devrenin çalışmasında bir bozulma meydana gelmemektedir.



Şekil 6.4 Ek Çalışma Aralıkları.

Eşdeğer parazitik kondansatörün değerine bağlı olarak oluşabilecek ek çalışma aralıklarına ait 2 adet eşdeğer devre şeması Şekil 6.5'te verilmiştir. Şekil 6.4'e göre oluşabilecek ek çalışma aralıkları Aralık 8e, 9e, 9e1 ve 9e2 şeklinde isimlendirilmiş olup, bu aralıklardaki çalışma prensibi ve analizler aşağıda sıralanmıştır.



Şekil 6.5 Ek Eşdeğer Devre Şemaları.

**Aralık 8e** [  $t_{10} < t < t_{12}'$  : Şekil 6.2(h) ]

$t=t_{10}$  anında,  $i_{T1}=0$ ,  $i_{T2}=I_i$ ,  $i_{DF}=0$ ,  $i_{Lsa}=I_{Lsa11}$ ,  $i_{Lsb}=I_i$ ,  $v_{Cs}=V_{Cs11}$  ve  $v_{Cp}=0$  eşitlikleri geçerlidir. Alt bastırma endüktans akımı  $i_{Lsb}$ 'nin  $I_i$ 'ye düşmesiyle başlayan bu aralıkta  $C_p$ - $L_{sa}$ - $L_{sb}$ - $C_s$  arasında sabit akım kaynağı altında bir rezonans başlar. Bu durum için,

$$L_{sa} \frac{di_{Lsa}}{dt} = v_{Cs} \quad (6.45)$$

$$L_{sb} \frac{di_{Lsb}}{dt} = v_{Cp} - v_{Cs} \quad (6.46)$$

$$C_s \frac{dv_{Cs}}{dt} = i_{Lsb} - i_{Lsa} \quad (6.47)$$

$$C_p \frac{dv_{Cp}}{dt} = I_i - i_{Lsb} \quad (6.48)$$

durum denklemleri yazılabilir. Oluşan rezonans ile alt bastırma endüktans akımı  $i_{Lsb}$  azalmaya devam eder.  $t=t_{11}'$  anında alt bastırma endüktans akımının sıfır olmasıyla yardımcı transistör kesime ve  $D_2$  diyodu ilettime girer.  $D_2$  diyodunun iletimde olduğu bu aralıkta  $T_2$  yardımcı transistorünün kontrol sinyali kesilir, böylece  $T_2$  yardımcı transistörü ZCT ile kesime girer.  $t=t_{12}'$ 'te  $v_{Cp}$  gerilimi çıkış geriliminin  $V_o$ 'a eşit olmasıyla  $D_F$  ana diyodu ilettime girer ve bu aralık sona erer.

**Aralık 9e** [  $t_{12}' < t < t_{13}'$  : Şekil 6.5(ii) ]

Bu aralığın başlangıcında  $i_{T1}=0$ ,  $i_{T2}=0$ ,  $i_{DF}=I_1-I_{Lsb12}'$ ,  $i_{Lsa}=I_{Lsa12}'$ ,  $i_{Lsb}=I_{Lsb12}'$ ,  $v_{Cs}=V_{Cs12}'$  ve  $v_{Cp}=V_o$  eşitlikleri geçerlidir.  $t=t_{12}'$  anında  $D_F$  diyodunun iletme girmesiyle başlayan bu aralıkta, üst ve alt bastırma endüktansları  $L_{sa}$  ve  $L_{sb}$  ile bastırma kondansatörü  $C_s$  arasında bir rezonans oluşur. Bu aralık için,

$$i_{Lsa} = \frac{V_o}{L_s}(t-t_{12}') - \frac{V_o}{\omega_e L_s} \sin(\omega_e(t-t_{12}')) \quad (6.49)$$

$$i_{Lsb} = \frac{V_o}{L_s}(t-t_{12}') + \frac{V_o}{\omega_e L_s L_{sb}} \sin(\omega_e(t-t_{12}')) \quad (6.50)$$

$$v_{Cs} = V_o \frac{L_{sa}}{L_s} (1 - \cos(\omega_e(t-t_{12}'))) \quad (6.51)$$

bağıntıları elde edilir. Bu bağıntılarda,

$$L_s = L_{sa} + L_{sb} \quad (6.52)$$

$$L_e = \frac{L_{sa} L_{sb}}{L_{sa} + L_{sb}} \quad (6.53)$$

$$\omega_e = \sqrt{\frac{1}{L_e C_s}} \quad (6.54)$$

eşitlikleri geçerlidir.  $t=t_{13}'$ 'te içinden geçen akımın sıfır olmasıyla  $D_2$  diyodu kesime girer ve bu aralık sona erer.

**Aralık 9e1** [  $t_{12} < t < t_{13}'$  : Şekil 6.2(i) ]

Bu aralığın başlangıcında  $i_{T1}=0$ ,  $i_{T2}=0$ ,  $i_{DF}=0$ ,  $i_{Lsa}=I_{Lsa12}$ ,  $i_{Lsb}=0$ ,  $v_{Cs}=V_{Cs12}$  ve  $v_{Cp}=V_{Cp12}$  eşitlikleri geçerlidir. Bu aralıkta iki farklı kapalı devre oluşur. Bir devrede  $C_p$  kondansatörü giriş akımı  $I_i$  ile lineer olarak şarj olur. Diğer devrede  $L_{sa}$  ve  $C_s$  arasında  $L_{sa}-C_s-D_3$  yolu ile bir rezonans oluşur. Bu aralık için aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$i_{Lsa} = I_{Lsa12} \cos(\omega_1(t - t_{12})) \quad (6.55)$$

$$v_{Cs} = Z_1 I_{Lsa12} \sin(\omega_1(t - t_{12})) - \frac{I_i}{C_s}(t - t_{12}) \quad (6.56)$$

$$v_{Cp} = \frac{I_i}{C_p}(t - t_{12}) \quad (6.57)$$

$t=t_{13}'$ 'te  $v_{Cp}$  gerilimi çıkış gerilimi  $V_o$ 'a eşit olduğunda  $D_F$  diyodu iletme girer ve bu aralık sona erer.

**Aralık 9e2** [  $t_{13}' < t < t_{13}$  : Şekil 6.5(iii) ]

Bu aralığın başlangıcında  $i_{T1}=0$ ,  $i_{T2}=0$ ,  $i_{DF}=I_i$ ,  $i_{Lsa}=I_{Lsa13}'$ ,  $i_{Lsb}=0$ ,  $v_{Cs}=V_{Cs13}'$  ve  $v_{Cp}=V_o$  eşitlikleri geçerlidir. Bu aralıkta  $D_F$  diyodu giriş akımını çıkışa aktarırken,  $L_{sa}$  ve  $C_s$  arasında  $L_{sa}$ - $C_s$ - $D_3$  yolu ile bir rezonans başlar. Bu aralıkta aşağıdaki eşitlikler oluşur.

$$i_{Lsa} = I_{Lsa13}' \cos(\omega_1(t - t_{13}')) \quad (6.58)$$

$$v_{Cs} = Z_1 I_{Lsa13}' \sin(\omega_1(t - t_{13}')) - \frac{I_i}{C_s}(t - t_{13}') \quad (6.59)$$

$t=t_{13}'$ 'te  $v_{Cs}$  geriliminin sıfır olmasıyla  $D_F$  diyodu kesime ve  $D_4$  diyodu iletme girer ve bu aralık sona erer. Çalışma Şekil 6.2(j)'de verilen eşdeğer devre ile devam eder.

## 6.5 Yumuşak Anahtarlama Şartları

Ana ve yardımcı anahtarlar için yumuşak anahtarlamanın sağlanabilmesi için aşağıdaki şartların sağlanması gerekmektedir.

### 6.5.1 Ana anahtarın ZVT ile iletme girmesi

Ana anahtar kesimdeyken, yardımcı anahtara kontrol sinyali uygulandığında, ana anahtar uçlarındaki parazitik kondansatörün tamamen deşarj olması ve dahili diyodunun iletme girmesi gerekmektedir. Diyotun iletimde olduğu aralık içerisinde ana anahtar kontrol sinyali uygulandığında ZVT ile iletme girme sağlanmış olur.

### 6.5.2 Ana anahtarın ZCT ile kesime girmesi

Ana anahtar iletimde ve giriş akımını geçirmekteyken, yardımcı anahtara kontrol sinyali uygulandığında oluşan rezonans devresinde akımının giriş akımından daha büyük bir değere çıkması ve ana anahtarın dahili diyodunun iletme girmesi gerekmektedir. Diyotun iletimde olduğu aralık içerisinde ana anahtarın kontrol sinyali kesildiğinde ZCT ile kesime girme sağlanmış olur.

### 6.5.3 Yardımcı anahtarın ZCS ile iletme girmesi

Yardımcı anahtara seri olarak bağlanmış olan alt bastırma endüktansı  $L_{sb}$ 'den dolayı anahtardan geçen akımın yükselme hızı sınırlanmıştır. Böylece yardımcı anahtarın ZCS iletme girmesi sağlanmış olmaktadır.

### 6.5.4 Yardımcı anahtarın ZCT ile kesime girmesi

Yardımcı anahtarın ZCT ile kesime girebilmesi için, bu anahtar iletimde iken oluşan rezonans ile bu anahtarın dahili diyodu  $D_2$ 'nin iletme girmesi ve bu diyodun iletimde olduğu aralıkta kontrol sinyalinin kesilmesi gerekmektedir.  $D_2$ 'nin iletme girmesi için ise üst bastırma endüktansının değeri alt bastırma endüktansının değerinden büyük olmalıdır.



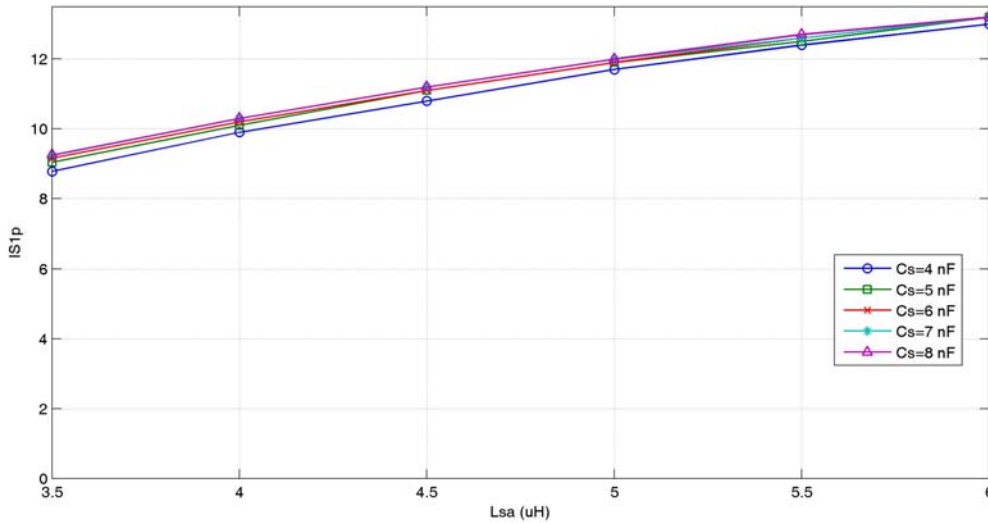
## 6.6 Dönüştürücüye ait Karakteristik Eğriler ve Dizayn İşlemi

### 6.6.1 Karakteristik Eğriler

Sunulan yeni ZVT-ZCT-PWM yüksek çıkışlı DC-DC dönüştürücünün tasarım işleminde kullanılmak üzere, dönüştürücünün karakteristik eğrileri çıkartılmış ve Şekil 6.6-Şekil 6.12’de verilmiştir. Bu eğrilerden bastırma hücresinde kullanılan elemanların değerleri tespit edilebilir.

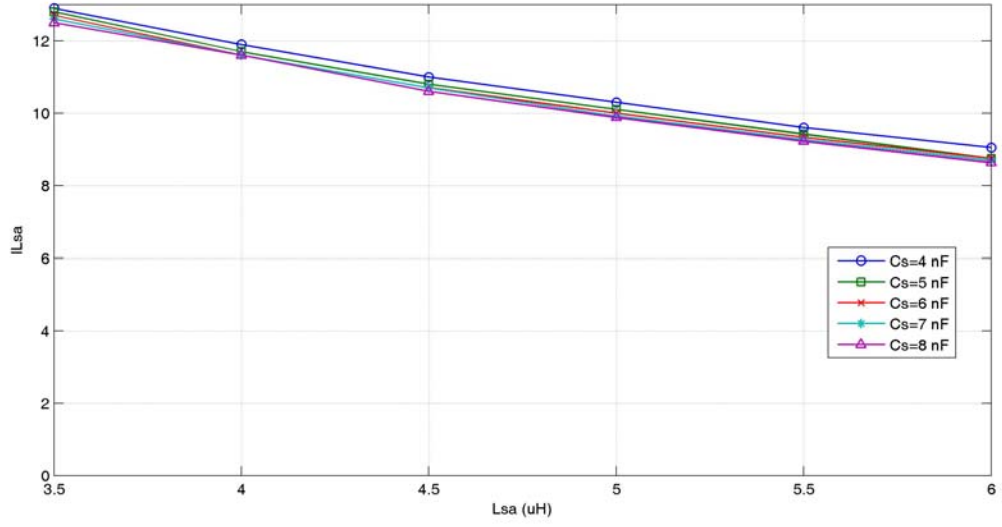
Karakteristik eğriler, yük akımının maksimum olduğu ve  $C_p$  parazitik kondansatörü ile  $L_{sb}$  alt bastırma endüktansının belirli olduğu kabul edilerek,  $C_s$  parametre olmak üzere  $L_{sa}$  üst bastırma endüktansına bağlı olarak elde edilmiştir.

Şekil 6.6’da ana anahtardan geçen akımın maksimum değerinin alt bastırma endüktansı  $L_{sa}$ ’ya bağlı karakteristiği verilmiştir. Bu karakteristikten, ana anahtar akımının maksimum değerinin,  $L_{sa}$  üst bastırma endüktansının değerinin artması ile arttığı,  $C_s$  bastırma kapasitansı değerinin artması ile çok az arttığı veya fazla etkilenmediği görülmektedir.

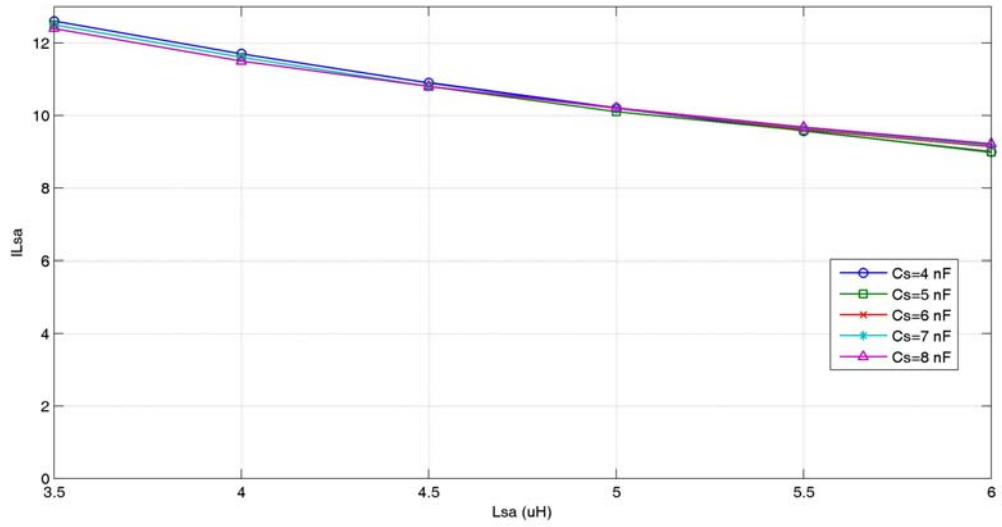


Şekil 6.6  $i_{S1p}$ - $L_{sa}$  karakteristiği.

Şekil 6.7(a) ve (b)'de sırası ile ana anahtarın ZVT ve ZCT aralıklarında  $I_{L_{sa}}$  akımının değişimi verilmiştir.  $L_{sa}$  ve  $C_s$ 'nin değerleri arttığında geçen akımın değerinin düştüğü görülmektedir.

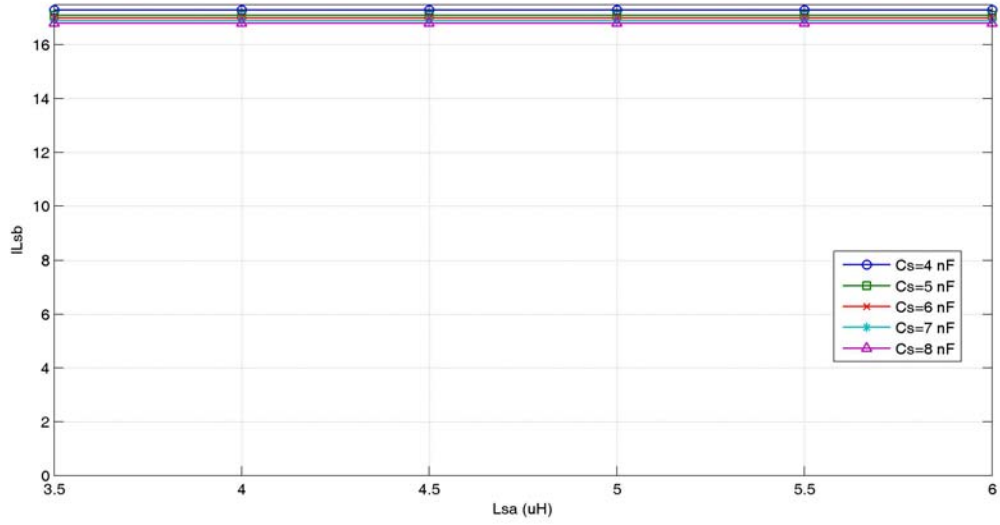


Şekil 6.7 (a) Ana anahtarın ZVT aralığında  $I_{L_{sa}}$ - $L_{sa}$  karakteristiği.

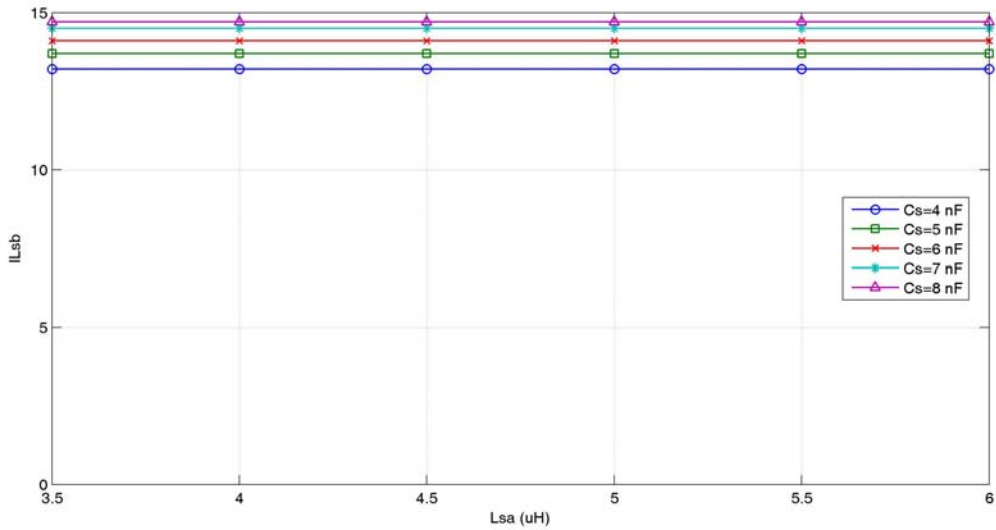


Şekil 6.7 (b) Ana anahtarın ZCT aralığında  $I_{L_{sa}}$ - $L_{sa}$  karakteristiği.

Şekil 6.8(a) ve (b)'de sırası ile ana anahtarın ZVT ve ZCT aralıklarında  $I_{L_{sb}}$  akımının değişimi verilmiştir.  $I_{L_{sb}}$  akımının,  $L_{sa}$  ile değişmediği ve  $C_s$ 'nin azalması ile arttığı görülmektedir.

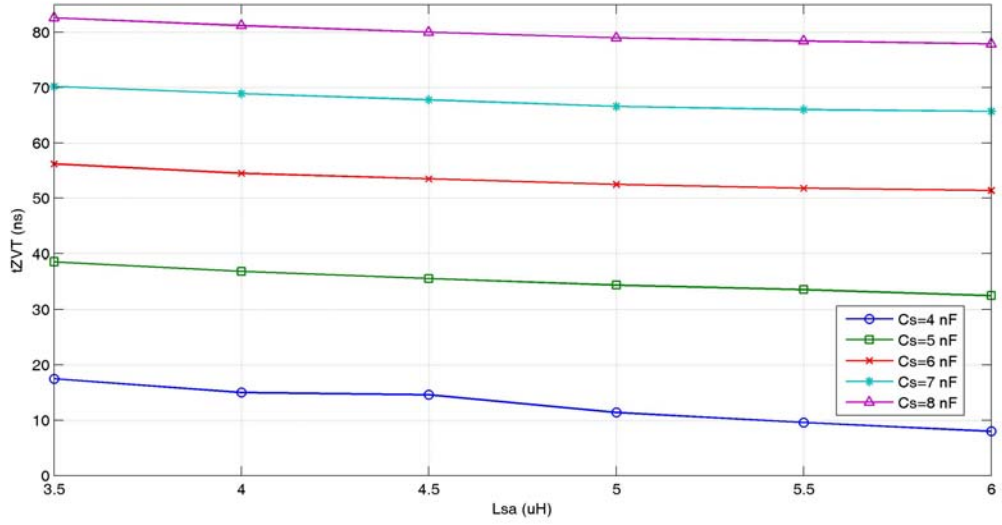


Şekil 6.8 (a) Ana anahtarın ZVT aralığında  $I_{Lsb}$ - $L_{sa}$  karakteristiği.



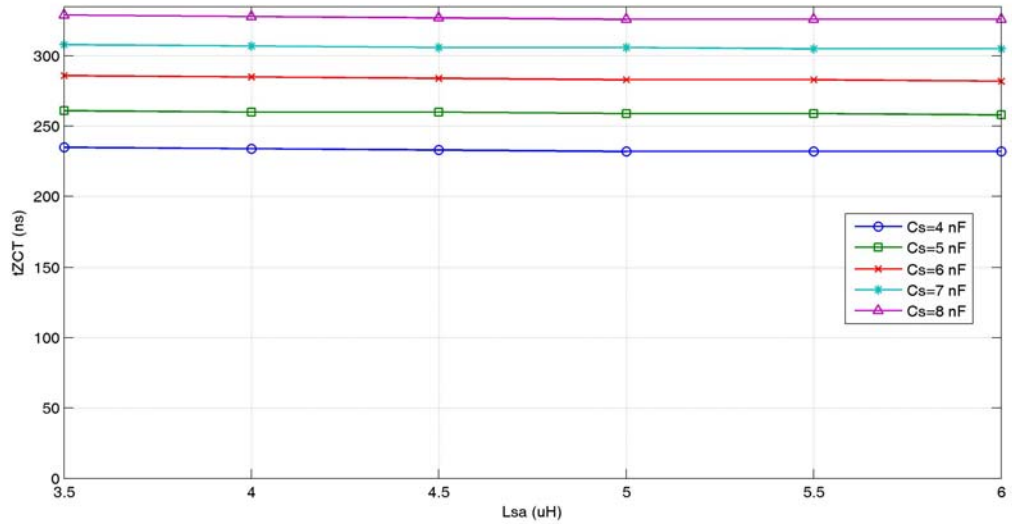
Şekil 6.8 (b) Ana anahtarın ZCT aralığında  $I_{Lsb}$ - $L_{sa}$  karakteristiği.

Şekil 6.9'da ana anahtarın ZVT süresinin  $L_{sa}$  ve  $C_s$ 'e bağlı değişimleri verilmiştir. Eğriden,  $L_{sa}$ 'nın artması ile ZVT aralığının azaldığı ve  $C_s$ 'nin artması ile arttığı görülmektedir. Şekil 6.8(a) ve (b)'den de görüldüğü gibi  $C_s$ 'nin artması ile  $I_{Lsb}$  akımını artmakta ve ana anahtarın dahili diyodunun iletim süresi yani ZVT aralığı artmaktadır.



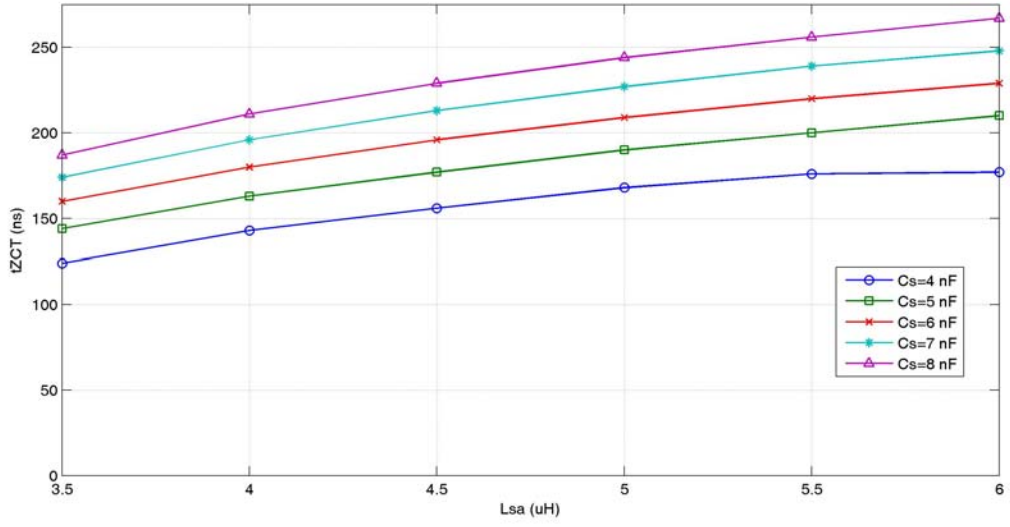
Şekil 6.9 Ana anahtarın ZVT aralığı- $L_{sa}$  karakteristiği.

Şekil 6.10'da ana anahtarın ZCT süresinin  $L_{sa}$  ve  $C_s$ 'e bağlı değişimleri verilmiştir.  $C_s$ 'nin artması ile ZCT süresi de artmaktadır. Fakat  $L_{sa}$ 'nın değişiminden ZCT süresi etkilenmemektedir. ZCT süresi,  $L_{sb}$  ile  $C_s$  arasındaki rezonansa bağlıdır.

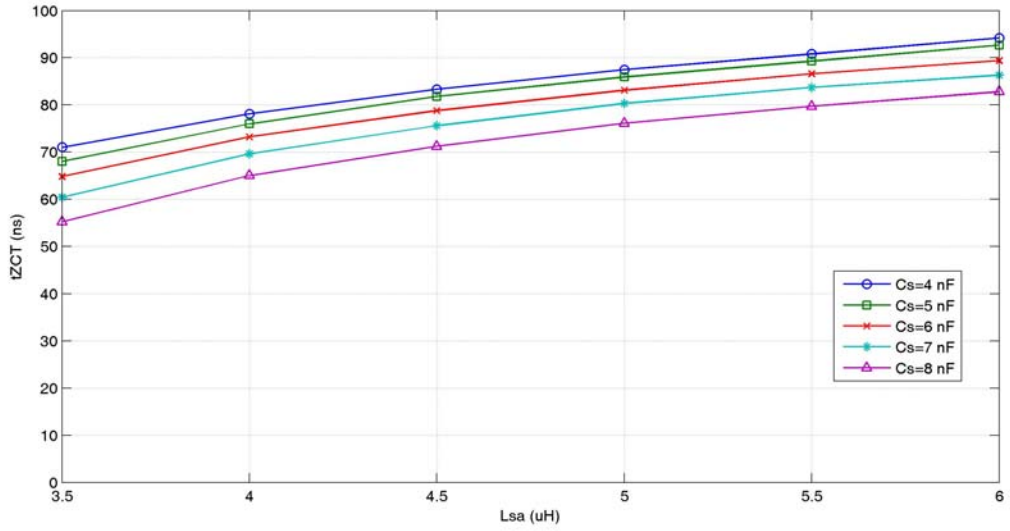


Şekil 6.10 Ana anahtarın ZCT aralığı- $L_{sa}$  karakteristiği.

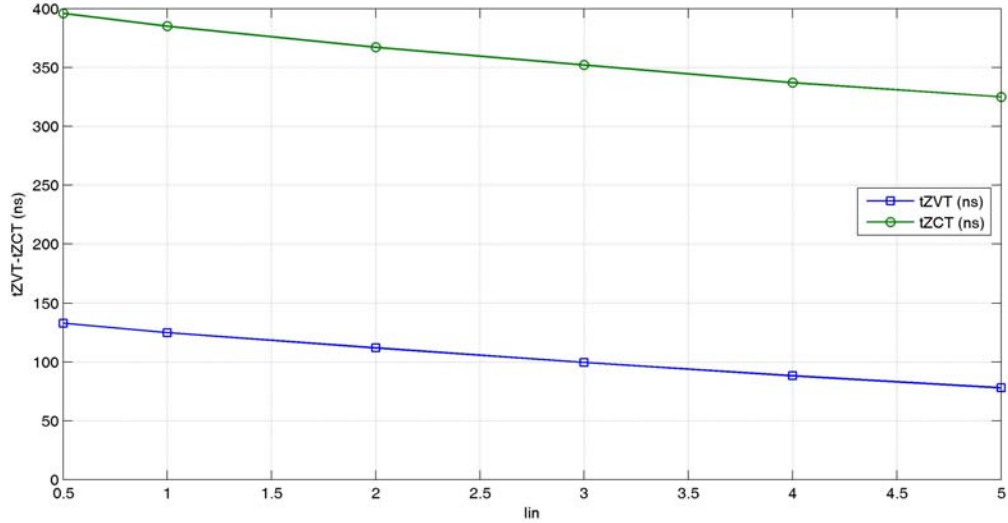
Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'de ana anahtarın ZVT ve ZCT aralıklarında yardımcı anahtarın ZCT sürelerinin  $L_{sa}$  ve  $C_s$ 'e bağlı değişimi gösterilmiştir. Her iki değişimde de  $L_{sa}$ 'nın artması ile bu süreler artmaktadır. Yardımcı anahtarın ZCT süresi,  $C_s$ 'nin artması durumunda ana anahtarın ZVT aralığında artmakta, ZCT aralığında ise düşmektedir.



Şekil 6.11 Ana anahtarın ZVT aralığında yardımcı anahtarın ZCT aralığı- $L_{sa}$  karakteristiği.



Şekil 6.12 Ana anahtarın ZCT aralığında yardımcı anahtarın ZCT aralığı- $L_{sa}$  karakteristiği.



Şekil 6.13 ZVT ve ZCT aralıklarının  $I_{in}$ 'e bağlı değişimi.

Şekil 6.13'te ana anahtarın ZVT ve ZCT aralıklarının  $I_{in}$  giriş akımına bağlı değişimi verilmiştir. Bu grafikten hafif yüklerde de ZVT ve ZCT aralıklarının mükemmel bir şekilde oluştuğu ve devrenin sağlıklı bir şekilde çalıştığı görülmektedir.

Sonuç olarak bu karakteristikler kullanılarak gerekli ZVT ve ZCT sürelerini sağlamak üzere en küçük değerlerde  $L_{sa}$  ve  $C_s$  elemanları belirlenmelidir. Bu eleman değerlerinin büyük seçilmesi durumunda geçici rejim aralıklarının toplamı ve böylece iletim kayıpları artar. Ayrıca ana anahtarın akım stresinin makul seviyelerde kalması da dikkate alınmalıdır.

### 6.6.2 Dizayn İşlemi

- 1)  $C_p$  kondansatörü,  $S_1$  ana anahtarının parazitik ile ona katılan diğer parazitik kapasitansların toplamı olarak kabul edilmiştir.
- 2) Ana anahtarın maksimum giriş akımı kadar bir ilave akım stresine maruz kalması kabul edilebilir.
- 3) Ana anahtarın kesime girmesi esnasında negatif gerilim ile tutulduğu  $t_{ZCT1}$  süresi, en az bu anahtarın  $t_{f1}$  sönme veya düşme süresi kadar olmak üzere seçilmelidir. Bu durum,

$$t_{ZCT1} \geq t_{f1} \quad (6.60)$$

şeklinde tanımlanabilir.

- 4) Alt bastırma endüktansı  $L_{sb}$ 'nin değeri, yardımcı anahtarın ilettime girmesi esnasında ve

onun akım yükselme süresi kadar bir zamanda, en fazla maksimum yük akımı kadar bir akım artışına müsaade etmek üzere seçilir. Bu durum,

$$\frac{V_o}{L_{sb}} t_r \leq I_{o\max} \quad (6.61)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada  $C_s$ 'nin gerilimi bu aralıkta fazla artmadığı için dikkate alınmamıştır.

### 6.7 Dönüştürücünün Özellikleri

Teklif edilen bastırma hücresinin kullanıldığı ZVT-ZCT-PWM dönüştürücü, daha önce sunulan ZVT ve ZCT dönüştürücülerin her birindeki istenen özelliklerin çoğuna sahiptir ve bu dönüştürücülerdeki problemlerin çoğunu çözer. Yeni dönüştürücünün özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Dönüştürücüde bütün yarıiletken elemanlar yumuşak anahtarlama ile çalışır. Ana anahtar mükemmel bir şekilde ZVT ile iletme ve ZCT ile kesime girer. Yardımcı anahtar ise ZCS ile iletme ve ZCT ile kesime girer. Diğer elemanlar da yumuşak anahtarlama ile çalışır.

Ana anahtar hiçbir ilave gerilime maruz kalmaz. Ana anahtardaki akım stresi makul seviyelerdedir.

Ana diyot hiçbir ilave gerilim ve akıma maruz kalmaz.

Yardımcı anahtar üzerinde hiçbir ilave gerilim stresi yoktur.

Yeni dönüştürücü tüm şebeke ve yük aralığında yumuşak anahtarlama ile çalışır. Hafif yük şartlarında, ZVT olayında, ana anahtarın gerilimi  $t_{01}$  süresinin azalmasıyla daha önce sıfır olur ve bu da ana anahtarın ZVT ile iletme girmesinde bir problem oluşturmaz. ZCT olayında, giriş akımı  $I_i$ 'nin azalmasıyla dahili diyotun iletim süresi artar ve bu da ana anahtarın ZCT ile kesime girmesini etkilemez.

Dönüştürücü oldukça yüksek frekanslarda çalışabilir ve periyodun büyük bölümünde normal PWM dönüştürücü olarak davranır. Ayrıca sirkülasyon enerjisi de oldukça düşüktür. Geçici rejim aralıklarının toplamı anahtarlama periyodunun çok küçük bir kısmıdır.

Ana ve yardımcı anahtarların emiterleri ortak olduğundan dönüştürücünün kontrolü kolaydır.

Yeni dönüştürücü daha önce sunulmuş olan birçok ZVT ve ZCT dönüştürücü kadar ucuz ve

basittir. Ana anahtarın ZVT ile iletme ve ZCT ile kesime girmesi ve yardımcı anahtarın ZCS ile iletme ve ZCT ile kesime girmesinin sağlanmasına karşılık, sadece bir rezonans devresi kullanılır ve ilave elemanların sayısında önemli bir artış yoktur.

Teklif edilen yeni dönüştürücü diğer temel PWM dönüştürücülere de kolayca uygulanabilir.

Dönüştürücü herhangi bir pasif bastırma hücresi gerektirmez.



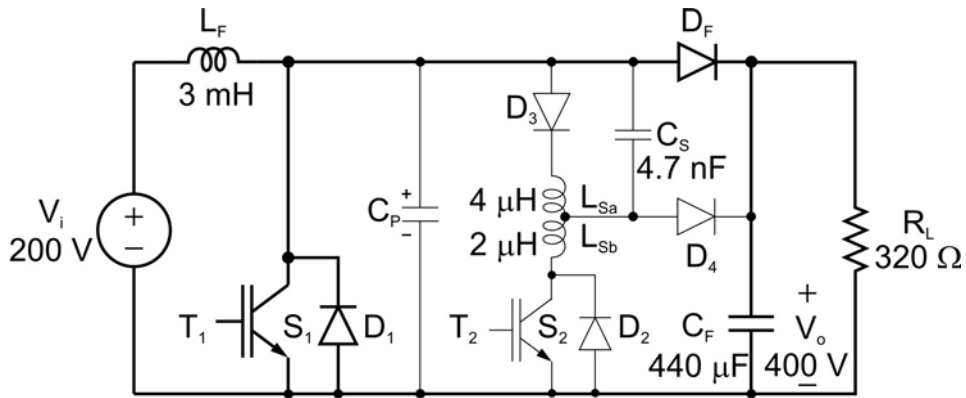
## 7. YENİ ZVT-ZCT-PWM YÜKSEK ÇIKIŞLI DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN UYGULAMASI

### 7.1 Giriş

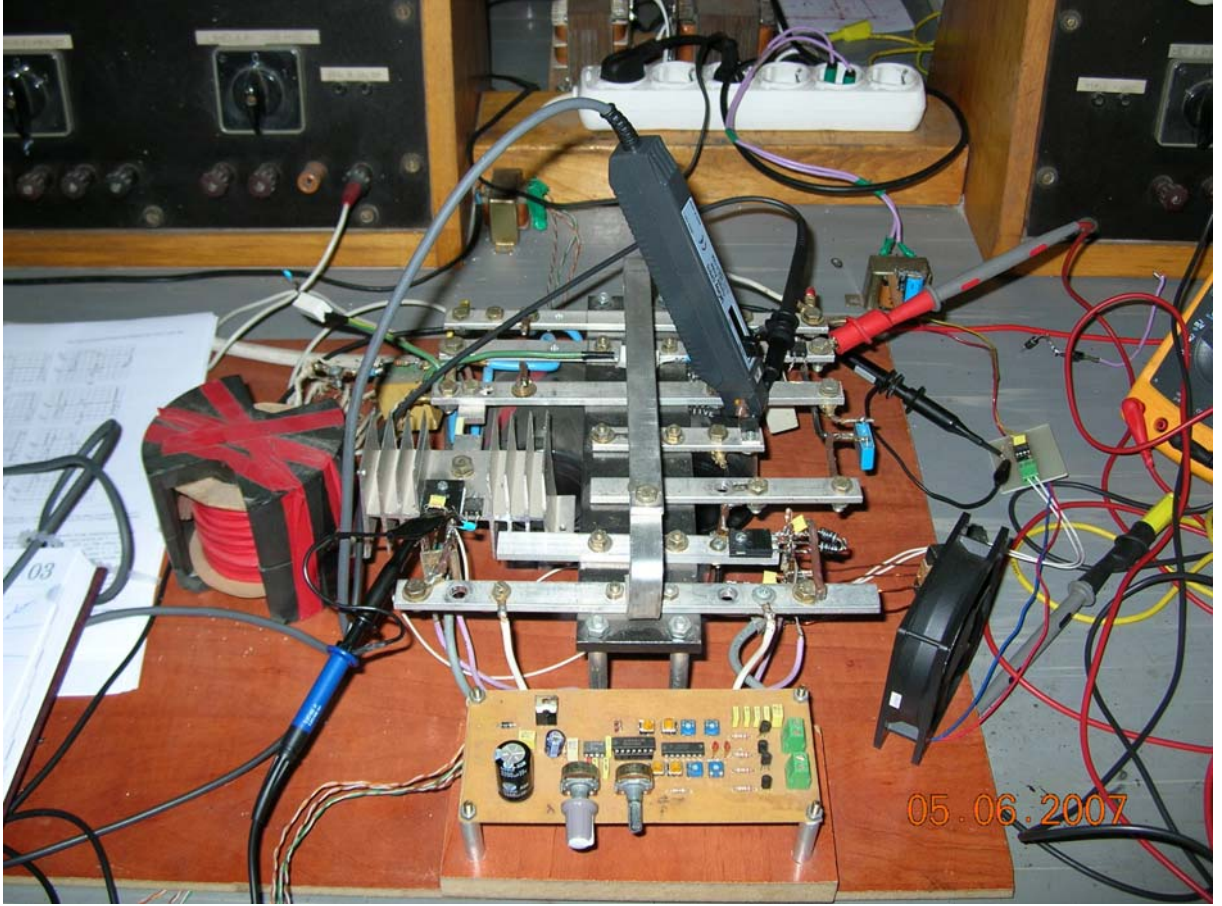
6. bölümde, sunulan yeni ZVT-ZCT-PWM yüksek çıkışlı DC-DC dönüştürücü devresi ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Bu analizi doğrulamak için, laboratuvarında önerilen bastırma hücresine sahip yüksek çıkışlı DC-DC dönüştürücü devresi gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde uygulama devresinden alınan deneysel sonuçlar etraflı bir şekilde sunulmuştur. Bastırma devresi için öngörülen teorik analiz ile elde edilen deneysel sonuçların tam bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

### 7.2 Devre Şeması

Laboratuvarında gerçekleştirilen 500 W ve 100 kHz'lik ZVT-ZCT-PWM yüksek çıkışlı DC-DC dönüştürücünün deneysel devre şeması Şekil 7.1'de ve deney düzeneğine ait fotoğraf Şekil 7.2'de verilmiştir. ZVT-ZCT-PWM yüksek çıkışlı DC-DC dönüştürücü devresi, temel yükseltici dönüştürücüye önerilen bastırma hücresinin eklenmesiyle elde edilmiştir. Temel yükseltici dönüştürücü, bir ana endüktans ( $L_F$ ), ters akım diyotlu bir ana transistör ( $T_1+D_1$ ) ve bir ana diyot ( $D_F$ ) elemanlarından oluşmaktadır. Bastırma hücresi ise, ters akım diyotlu bir yardımcı transistör ( $T_2+D_2$ ), iki yardımcı diyot ( $D_3$  ve  $D_4$ ), alt ve üst bastırma endüktansları ( $L_{sa}$  ve  $L_{sb}$ ) ile bir bastırma kondansatörü ( $C_s$ ) elemanlarından oluşmaktadır.



Şekil 7.1 Yeni ZVT-ZCT-PWM yüksek çıkışlı DC-DC dönüştürücünün deneysel devre şeması.



Şekil 7.2 Laboratuvarında gerçekleştirilen uygulama devresi.

### 7.3 Uygulama Devresi

DC gerilim, üç fazlı şebeke gerilimiyle beslenen varyak çıkışından alınan üç fazlı AC gerilimin diyot köprüsüyle doğrultulması ve yüksek değerli bir kondansatör ( $4400 \mu\text{F} - 400 \text{V}$ ) ile filtre edilmesiyle elde edilmiştir.  $L_F$  ana endüktansı yeterince büyük değerli ( $3 \text{ mH}$ ) seçilmiştir. Karakteristik eğriler kullanılarak basırma devresinin,  $L_{sa}$  üst bastırma endüktansı  $4 \mu\text{H}$ ,  $L_{sb}$  alt bastırma endüktansı  $2 \mu\text{H}$  ve  $C_s$  bastırma kondansatörü  $4.7 \text{ nF}$  olarak seçilmiştir. Yeni ZVT-ZCT-PWM yüksek çıkışlı DC-DC dönüştürücü devresinde kullanılan yarı iletken elemanların nominal değerleri Çizelge 7.1’de verilmiştir.

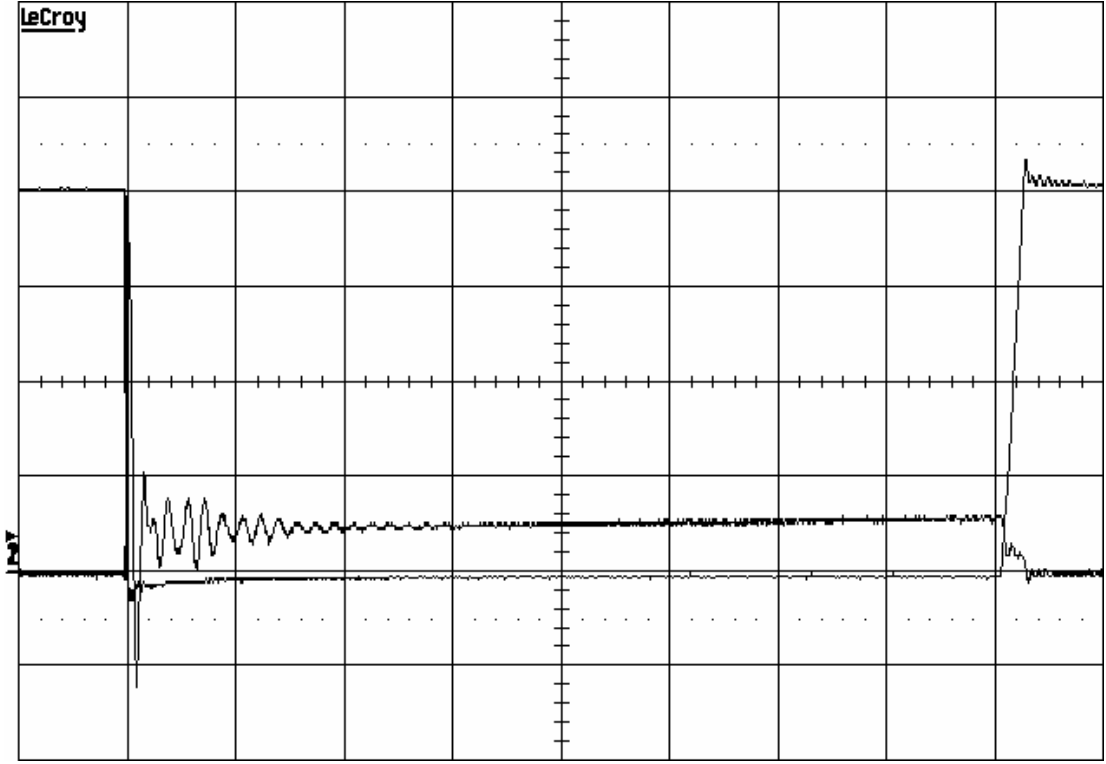
Çizelge 7.1 Uygulama sisteminde kullanılan yarı iletken elemanların bazı nominal değerleri.

YARI İLETKEN ELEMEN		V ( V )	I ( A )	$t_r$ ( ns )	$t_f$ ( ns )	$t_{rr}$ ( ns )
S <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	600	36	45	40	-
	D <sub>1</sub>	600	36	-	-	250
S <sub>2</sub>	T <sub>2</sub>	500	21	45	60	-
	D <sub>2</sub>	500	21	-	-	250
D <sub>F</sub>		600	8	-	-	60
D <sub>3, D4</sub>		600	8	-	-	50

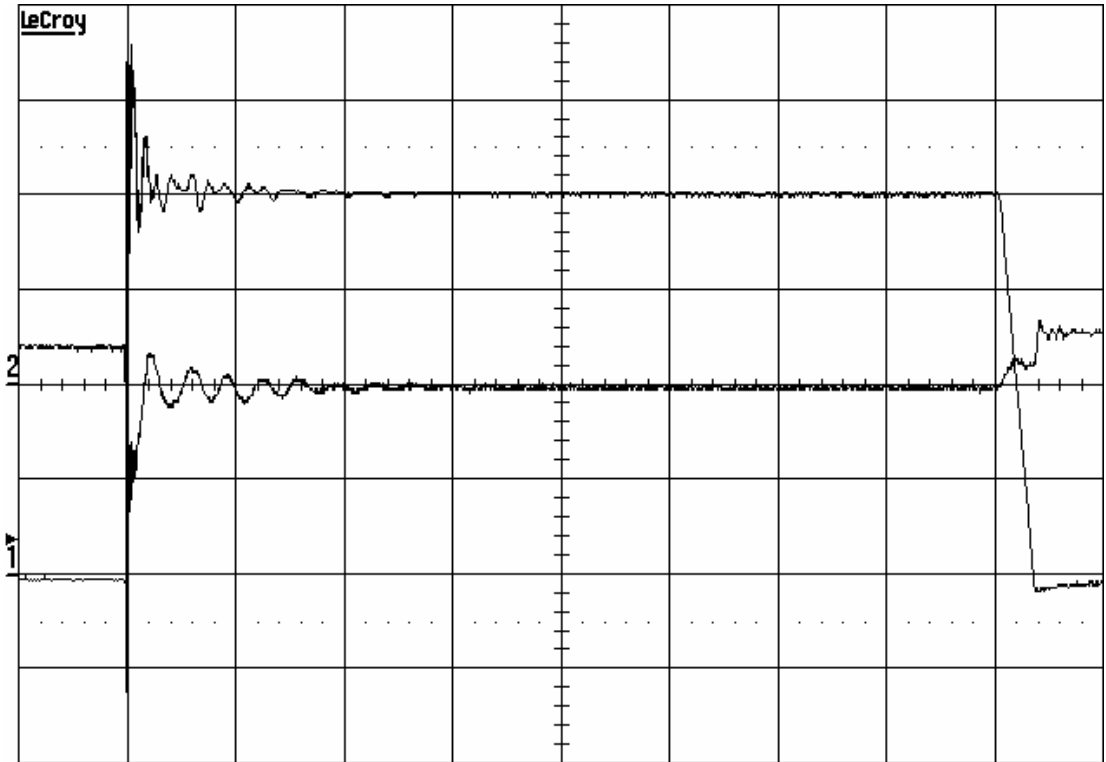
#### 7.4 Uygulama Sonuçları

Laboratuvarda gerçekleştirilen ZVT-ZCT-PWM yüksek çıkışlı DC-DC dönüştürücü devresinden alınan osilogramlar, Şekil 7.9-7.15'te verilmiştir.

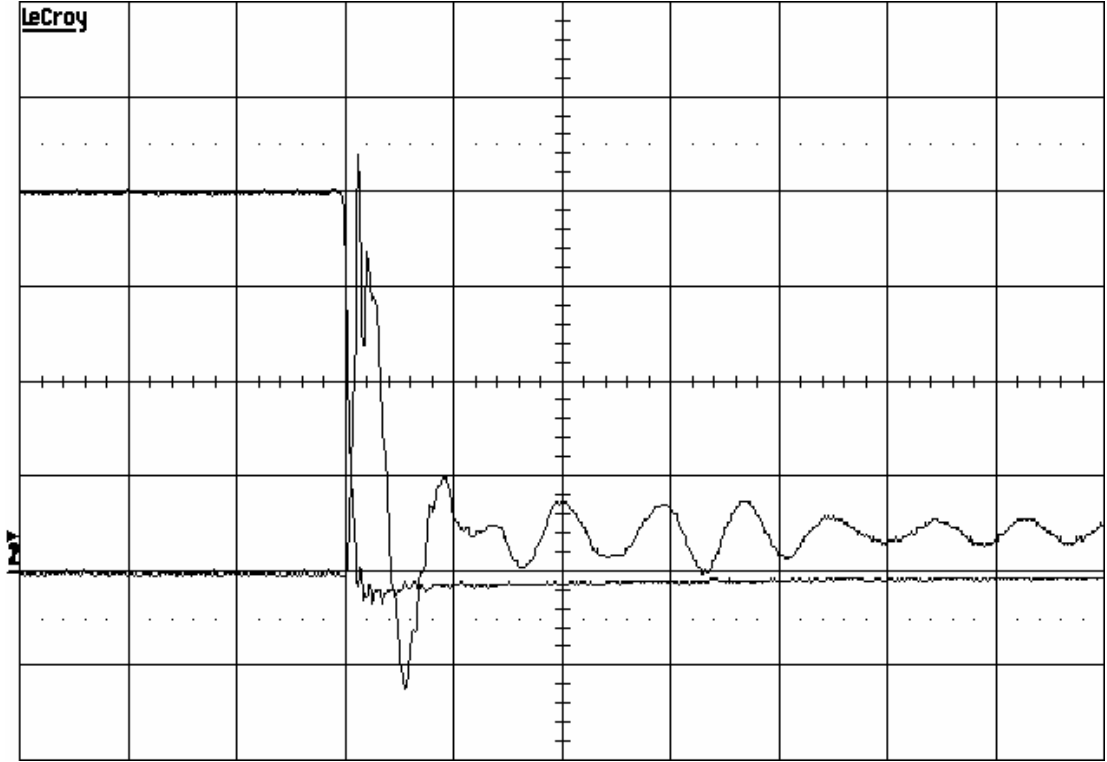
Sert anahtarlamalı dönüştürücüde, ana anahtar ile ana diyodun gerilim ve akım dalga şekilleri sırasıyla Şekil 7.3-7.8'de verilmiştir. Burada, ana anahtar S<sub>1</sub> ve ana diyot D<sub>F</sub>'nin iletme ve kesime girmede sert anahtarlama ile çalıştığı görülmektedir. Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'ten de görüldüğü gibi eşzamanlı olarak oluşan S<sub>1</sub>'in iletme girme ve D<sub>F</sub>'nin kesime girme işlemi esnasında, bu iki elemandan büyük bir kısa devre akımı geçmekte ve bu akım büyük bir enerji kaybına sebep olmaktadır. Ana anahtarın iletme ve kesime girme anlarındaki gerilim ve akım değişimleri sırasıyla Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'da verilmiştir. Bu değişimlerden ana anahtarın iletme girme anında, ana diyod hemen kesime girmediğinden anahtardan kısa devre akımının geçtiği ve kesime girme anında ise uçlarındaki gerilim ile içinden geçen akımın çakıştığı görülmektedir. Benzer şekilde ana diyodun iletme ve kesime girme anlarındaki gerilim ve akım değişimleri sırasıyla Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'de verilmiştir. Bu değişimlerden ana diyodun iletme girme anında uçlarındaki gerilim ile içinden akımın çakıştığı ve kesime girme anında ise ters toparlanma süresinden dolayı diyodun hemen kesime girmediği ve ana anahtar ile birlikte bir süre iletimde kaldığından diyottan bir kısa devre akımının geçtiği görülmektedir.



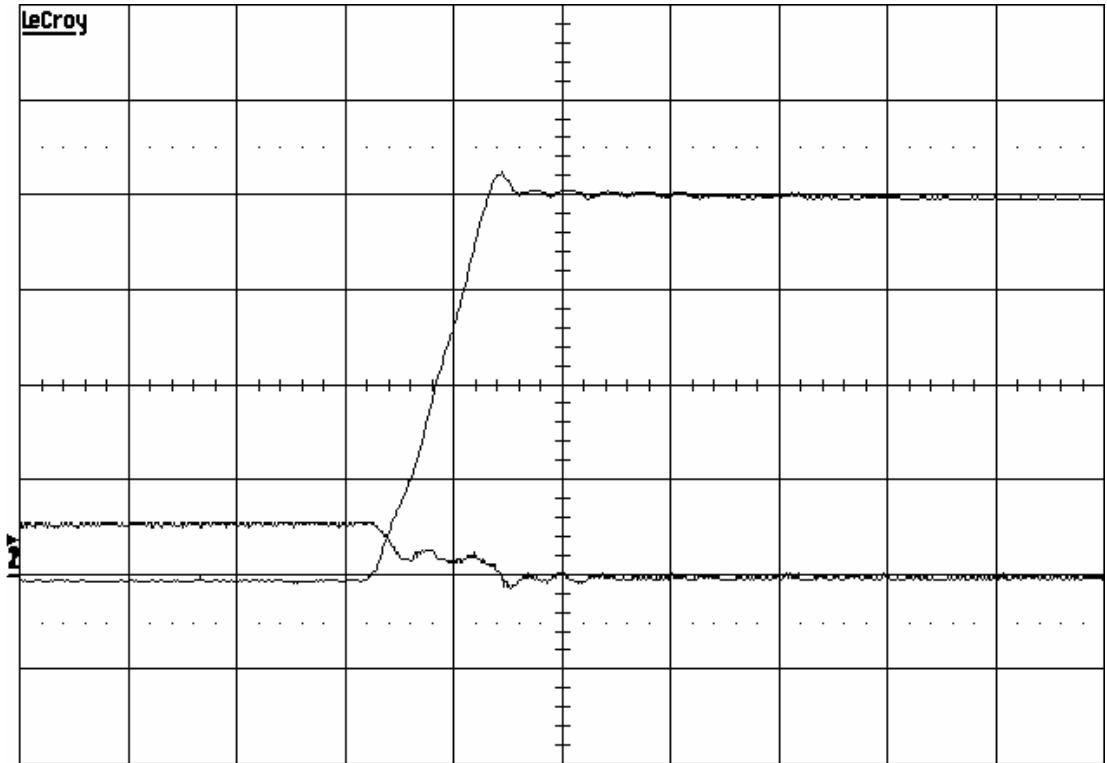
Şekil 7.3 Sert anahtarlama ana anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 4 A/kare ve 10 $\mu$ s/kare olarak ölçeklidir.



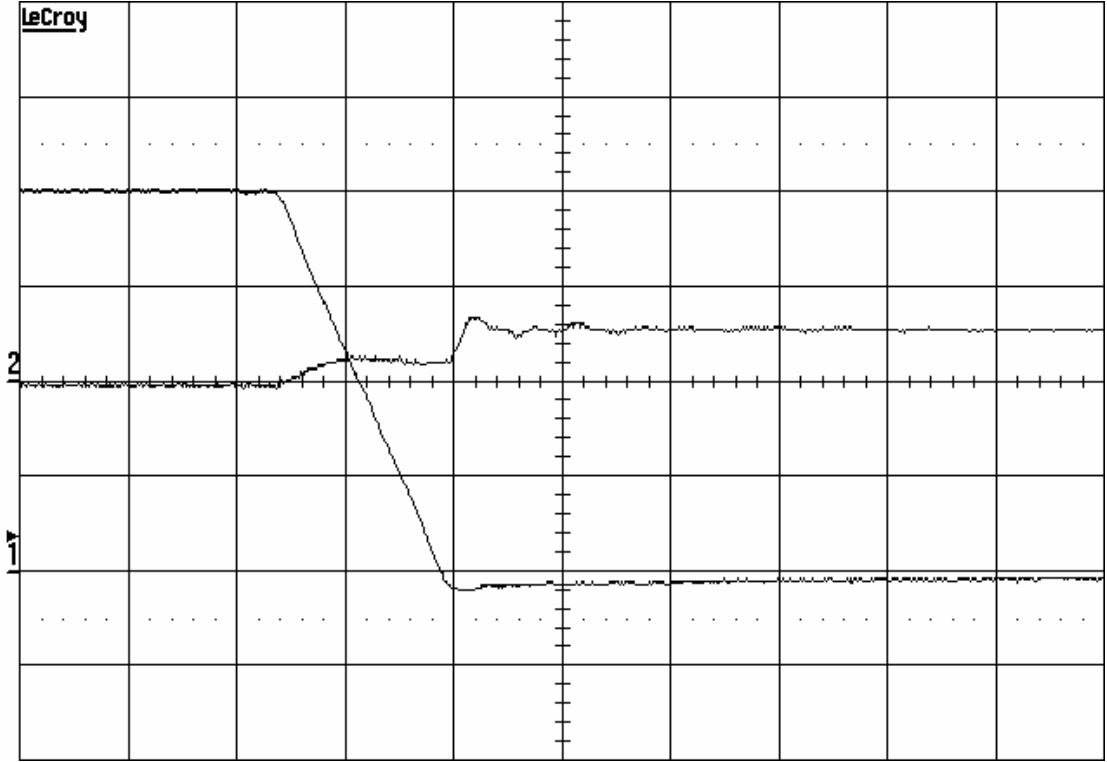
Şekil 7.4 Sert anahtarlama ana diyodun gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 4 A/kare ve 10 $\mu$ s/kare olarak ölçeklidir.



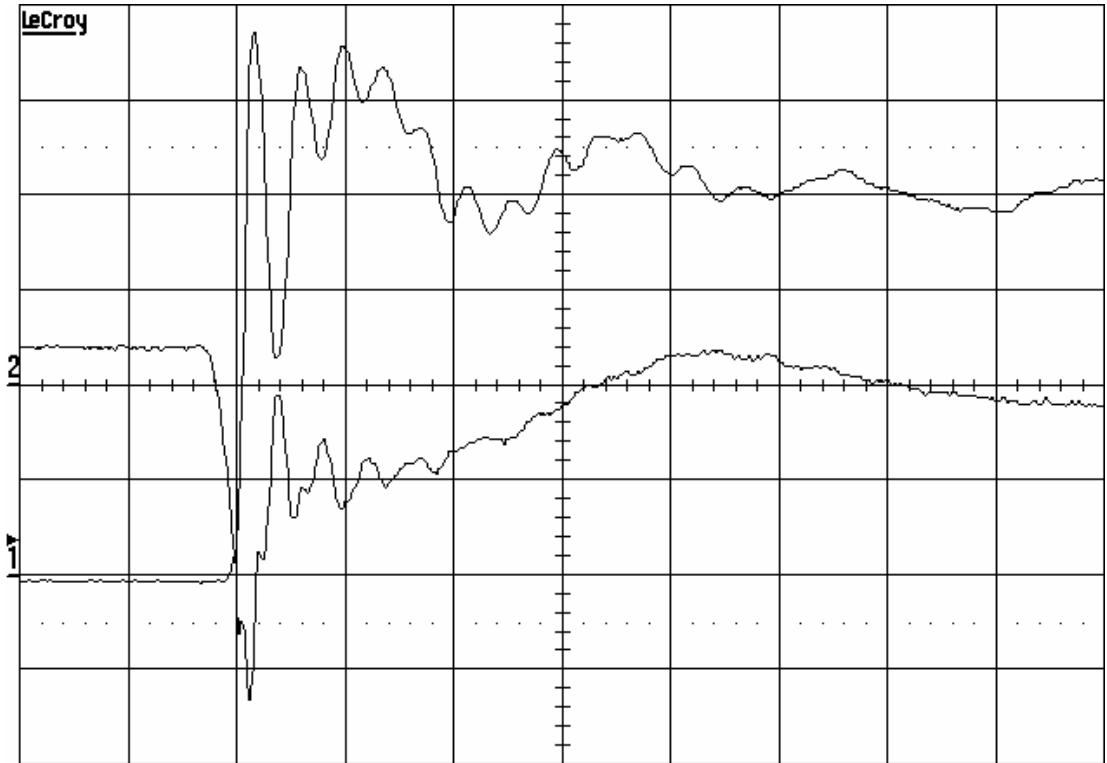
Şekil 7.5 Sert anahtarlama da iletme girme esnasında ana anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 4 A/kare olarak ölçeklidir.



Şekil 7.6 Sert anahtarlama da kesime girme esnasında ana anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 4 A/kare olarak ölçeklidir.



Şekil 7.7 Sert anahtarlama da iletime girme esnasında ana diyodun gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 4 A/kare olarak ölçeklidir.



Şekil 7.8 Sert anahtarlama da kesime girme esnasında ana diyodun gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 4 A/kare olarak ölçeklidir.

Şekil 7.9'da ana ve yardımcı anahtarlara ait kontrol sinyalleri görülmektedir. Yardımcı anahtar, ana anahtarın bir anahtarlama periyodunda iki defa açılıp kapanmaktadır. Ana anahtarın iletme girme sinyalinden 150 ns önce yardımcı anahtarın kontrol sinyali uygulanmakta ve 80 ns sonra kesilmektedir. Benzer şekilde ana anahtarın kesime girme sinyalinden 100 ns önce yardımcı anahtarın kontrol sinyali uygulanmakta ve 150 ns sonra kesilmektedir.

Şekil 7.10-Şekil 7.12'den görüldüğü gibi ana transistör  $T_1$  hem iletme hem de kesime girmede yumuşak anahtarlama ile çalışır,  $T_1$ 'in akım ve gerilimi arasında hiçbir çakışma yoktur. Ana anahtarda sadece iletim kayıpları mevcuttur. Ana transistorün iletim ve kesime girmesi esnasında önce onun ters paralel diyodu  $D_1$  iletme girer, böylece ana transistörün ZVT ile iletme girmesi ve ZCT ile kesime girmesi mükemmel bir şekilde sağlanır. Ayrıca, değişimlerden ana anahtarın herhangi bir gerilim stresine maruz kalmadığı ve içerisinden geçen akımda ise kısa süreli makul bir akım stresinin olduğu görülür. Bu kısa süreli akım stresinden dolayı elemandaki iletim kayıpları çok az artar.

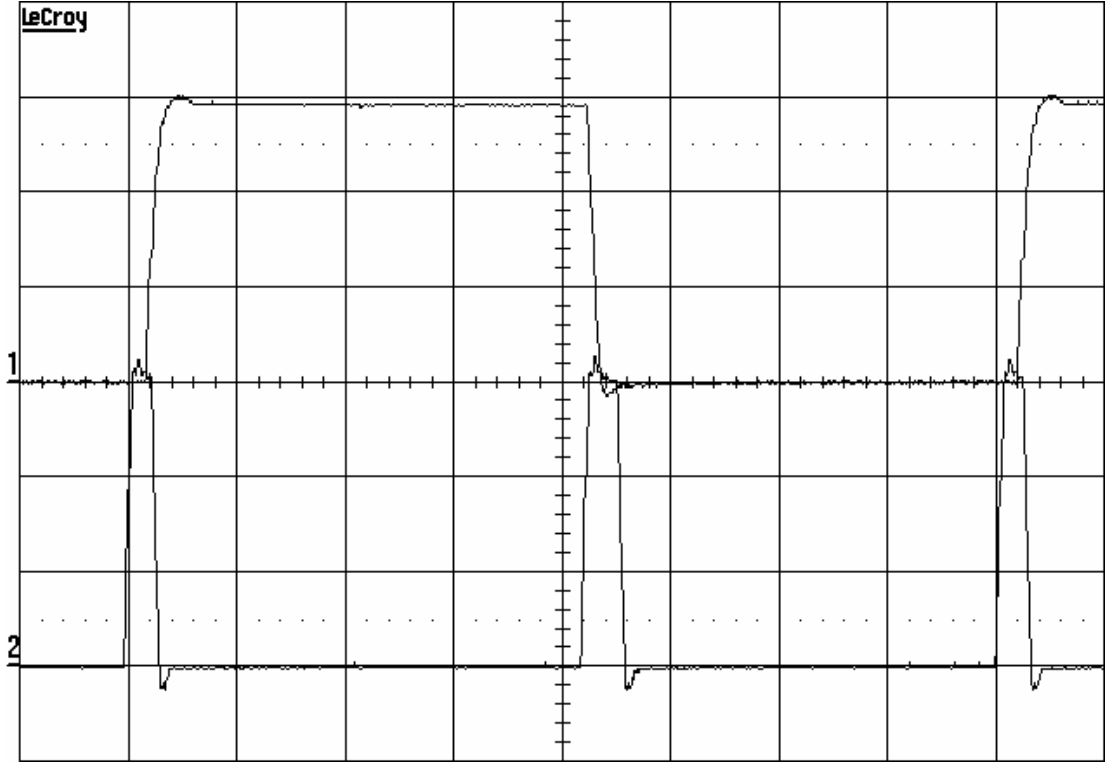
Şekil 7.13'ten ana diyodun ZVS ile iletme girdiği ve yaklaşık ZCS ve ZVS ile kesime girdiği ve herhangi bir ilave gerilim ve akım stresine maruz kalmadığı görülmektedir.

Şekil 7.14-Şekil 7.16'da yardımcı anahtarın gerilim ve akım değişimleri verilmiştir. Yardımcı anahtar ana anahtarın hem ZVT hem de ZCT işlemlerinde aktif hale geldiğinden, ana anahtarın bir anahtarlama periyodu içerisinde iki defa anahtarlanmaktadır. Yani ana anahtar 100 kHz anahtarlama frekansı ile çalışırken yardımcı anahtar 200 kHz anahtarlama frekansı ile çalışmaktadır. Her iki çalışmada da yardımcı anahtar çok kısa süre iletimde kalmaktadır. Yardımcı anahtarın yaklaşık olarak ZCS altında iletme girdiği ve dahili diyodu iletimde iken kontrol sinyali kesildiğinden ZCT ile mükemmel bir şekilde kesime girdiği görülmektedir. ZCT aralığında yardımcı anahtardan geçen akımın tepe değeri ZVT çalışma aralığındakine göre daha düşüktür. Bu rezonans devresindeki kayıplardan kaynaklanmaktadır. Değişimlerden de görüldüğü gibi, yardımcı anahtarın yumuşak anahtarlama ile çalışması sağlanırken elemanın maruz kaldığı gerilim çıkış gerilimini aşmamaktadır yani elemanda hiçbir ilave gerilim stresi yoktur.

Şekil 7.17'de bastırma kondansatörünün gerilim ve akım değişimleri verilmiştir. ZVT aralığında yardımcı anahtarın iletme girmesiyle başlayan rezonansla kondansatör uçlarındaki gerilim artmaya başlar. ZVT aralığının sonunda kondansatör geriliminin yaklaşık olarak çıkış geriliminin yarısına kadar dolduğu görülmektedir. ZCT aralığının sonunda kondansatör

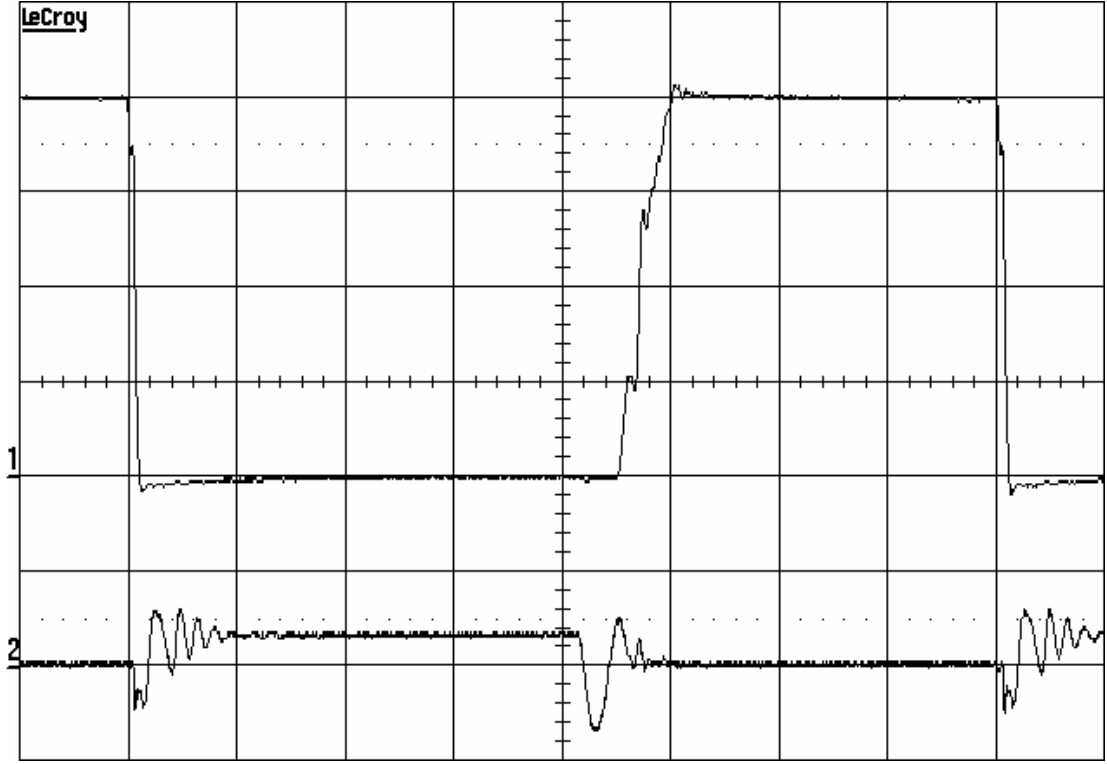
geriliminin sıfırlandığı görülmektedir.

Şekil 7.18 ve Şekil 7.19'da sırasıyla  $D_3$  ve  $D_4$  diyotlarının gerilim ve akım değişimleri verilmiştir. Diyotların ters toparlanma akımları ile parazitik kondansatörlerin şarj akımları da değişimlerde görülmektedir.

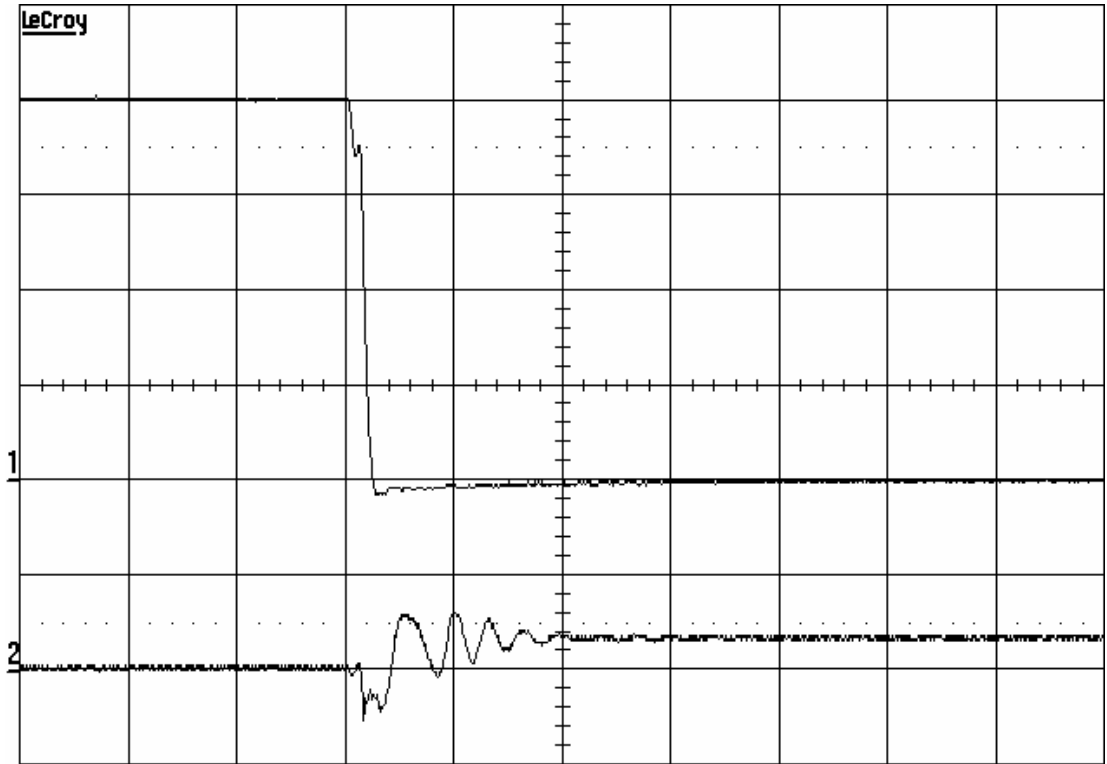


Şekil 7.9 Ana ve yardımcı anahtarların kontrol sinyalleri. 5 V/kare ve 1 $\mu$ s/kare olarak ölçeklidir.

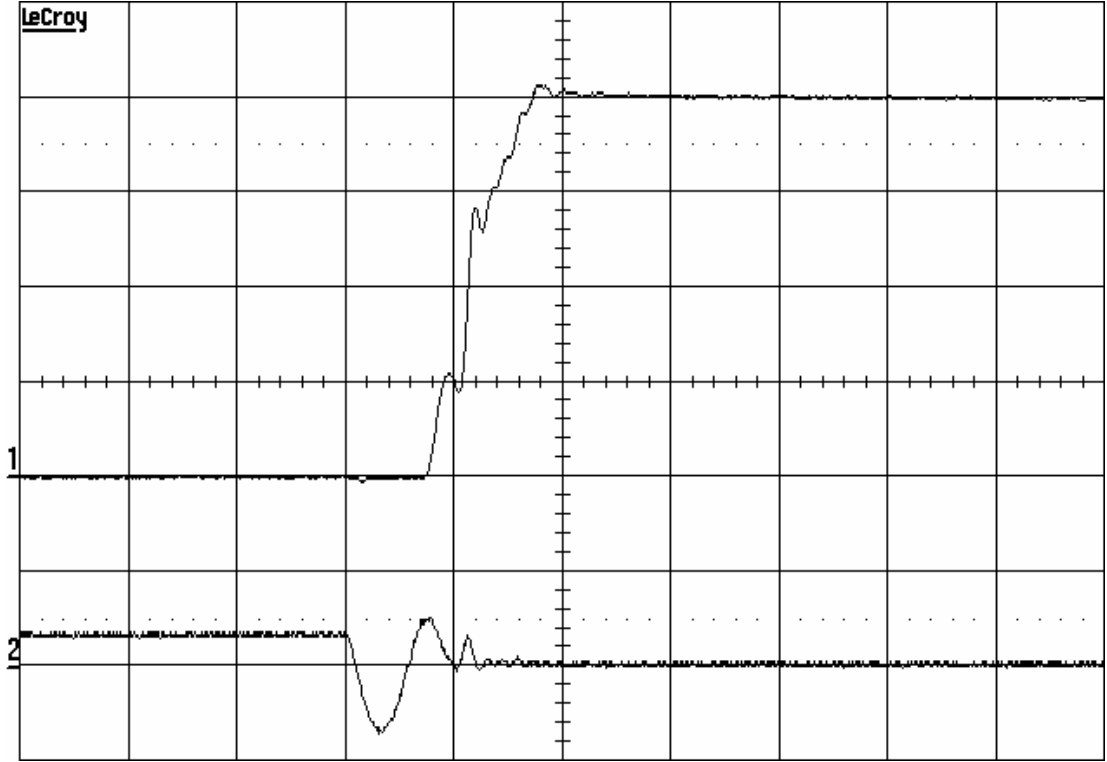




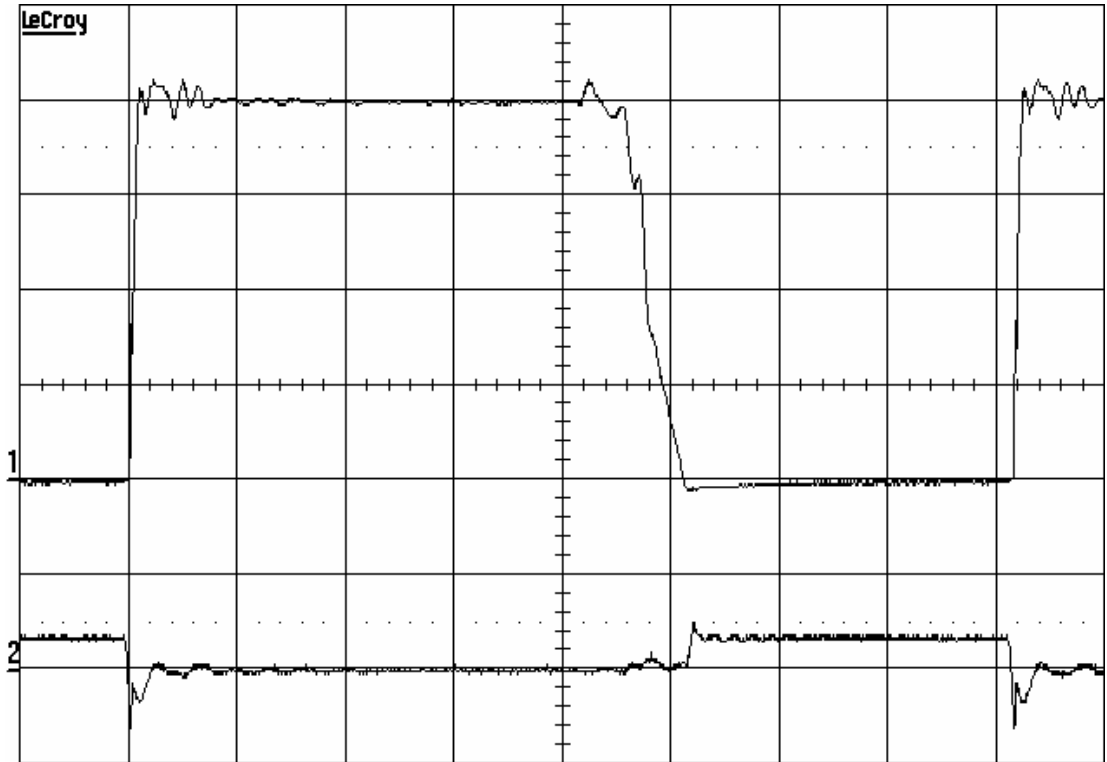
Şekil 7.10 Ana anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve  $1\mu\text{s}$ /kare olarak ölçeklidir.



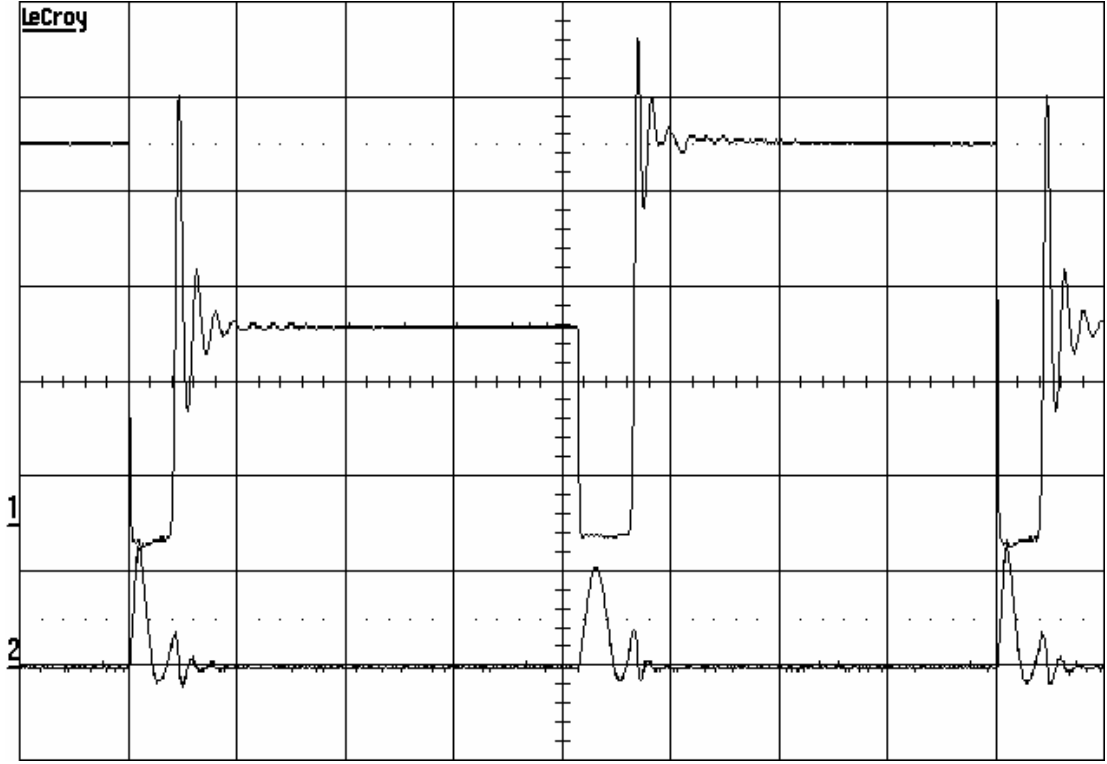
Şekil 7.11 İletime girme esnasında ana anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve  $0.5\mu\text{s}$ /kare olarak ölçeklidir.



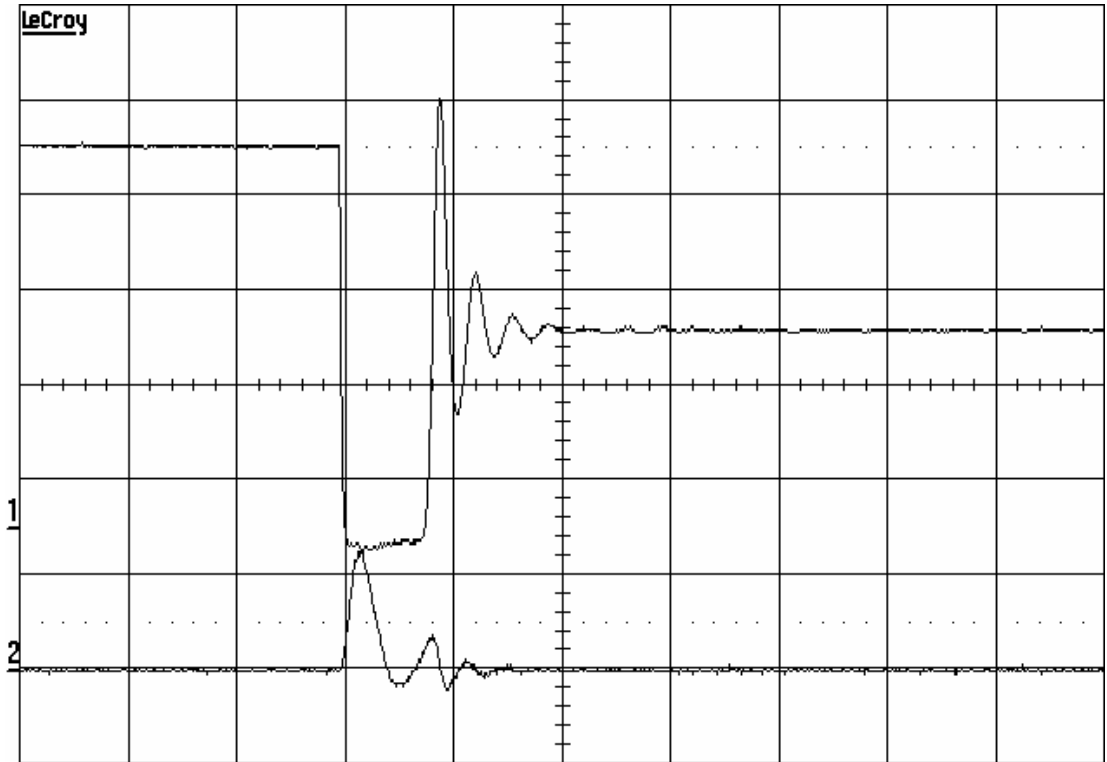
Şekil 7.12 Kesime girme esnasında ana anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve  $0.5\mu\text{s}$ /kare olarak ölçeklidir.



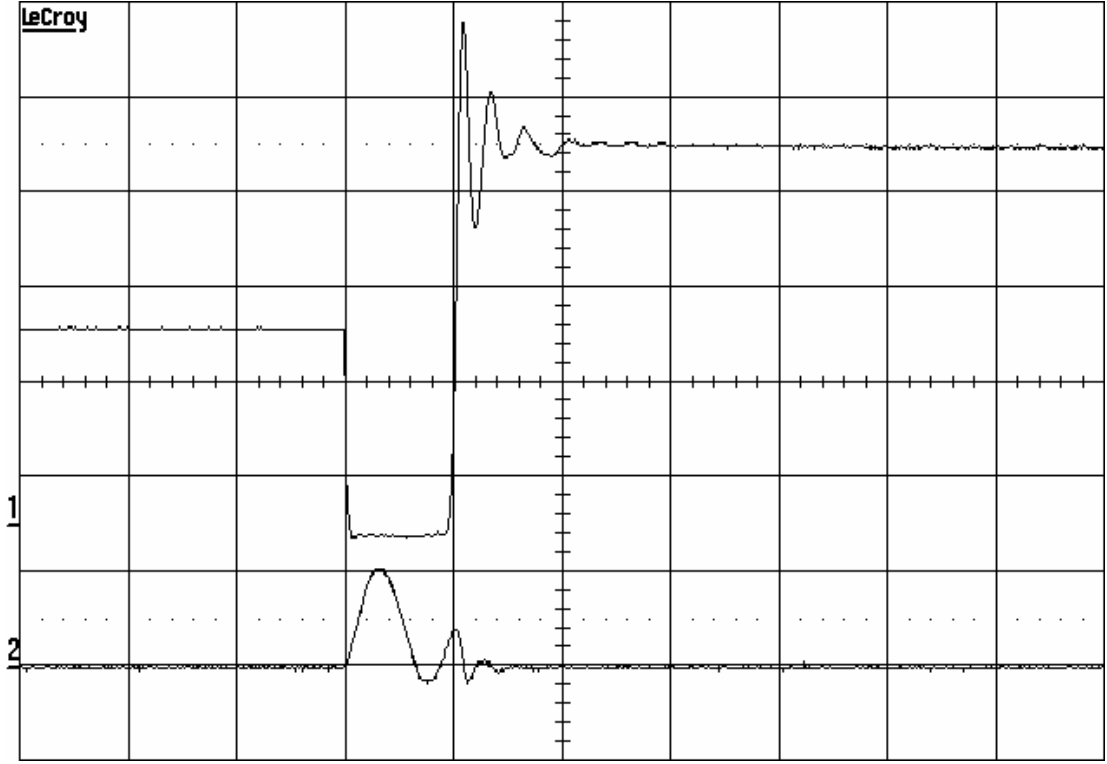
Şekil 7.13 Ana diyodun gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve  $1\mu\text{s}$ /kare olarak ölçeklidir.



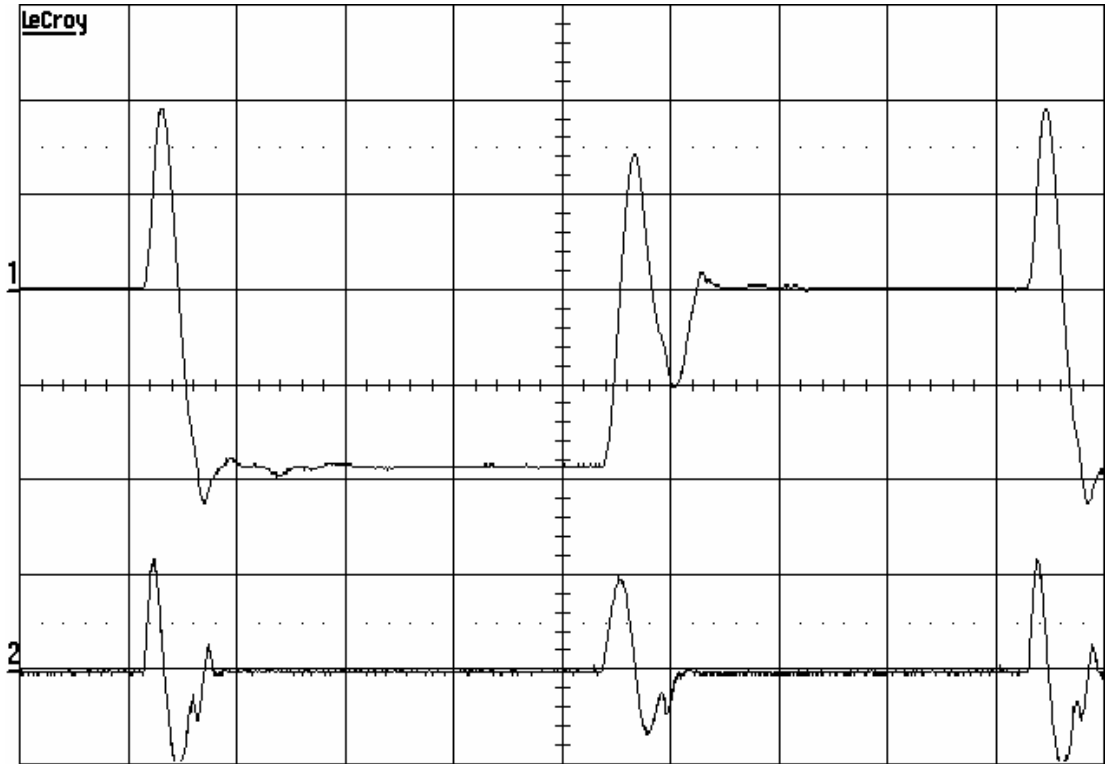
Şekil 7.14 Yardımcı anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve  $1\mu\text{s}$ /kare olarak ölçeklidir.



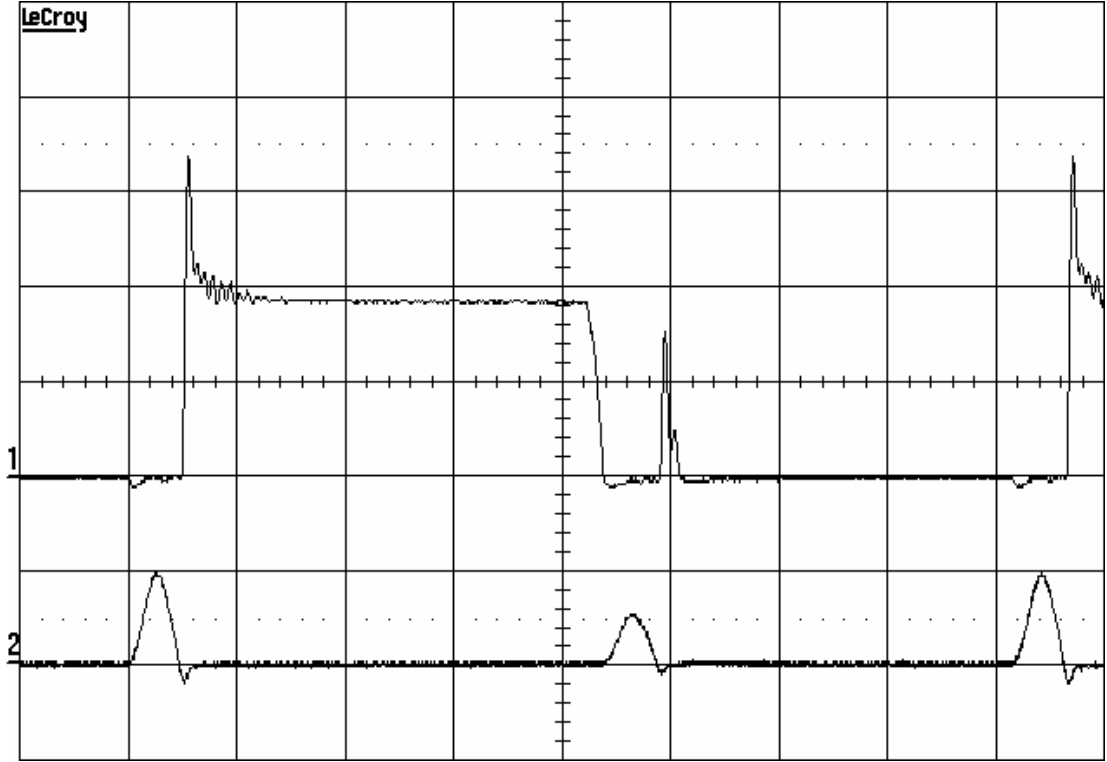
Şekil 7.15 ZVT aralığında yardımcı anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve  $0.5\mu\text{s}$ /kare olarak ölçeklidir.



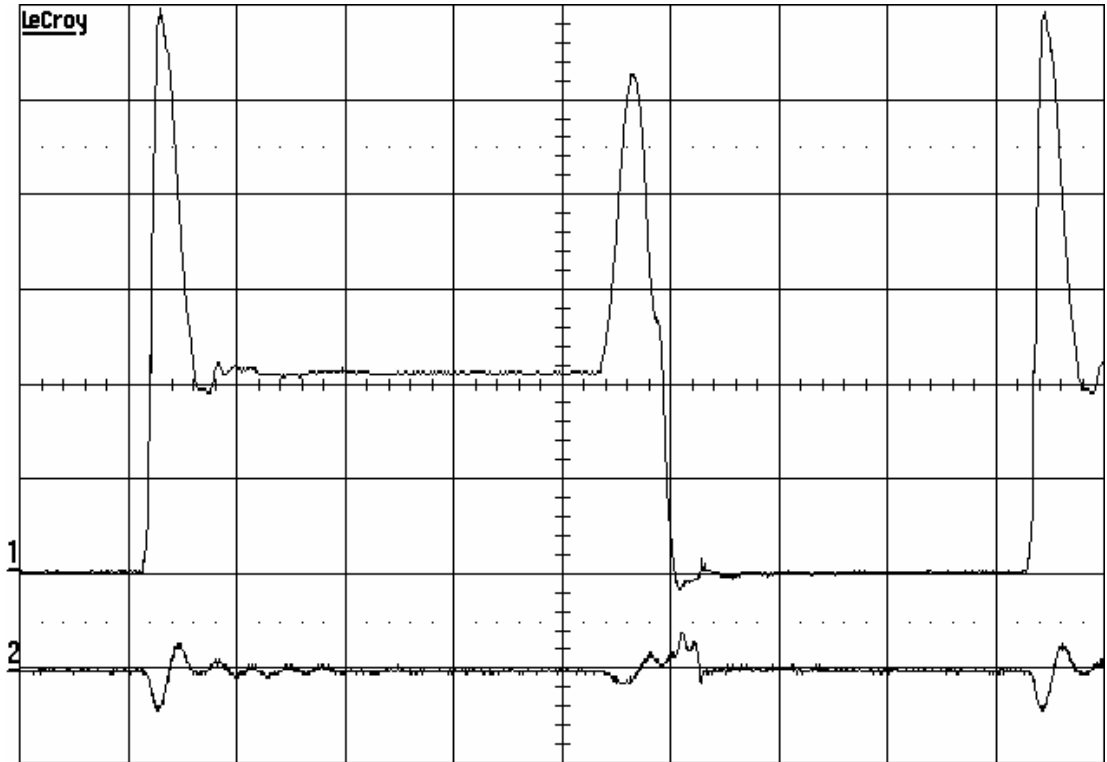
Şekil 7.16 ZCT aralığında yardımcı anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve 0.5µs/kare olarak ölçeklidir.



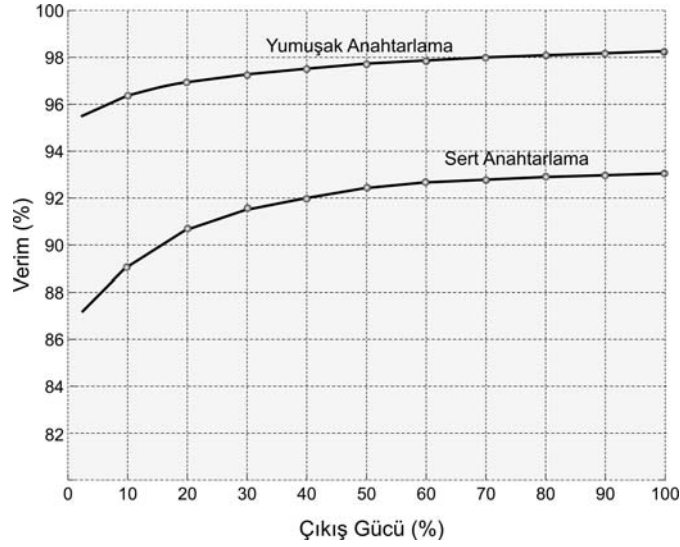
Şekil 7.17 Bastırma kondansatörünün gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve 1 µs/kare olarak ölçeklidir.



Şekil 7.18 D<sub>3</sub> diyodunun gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve 1  $\mu$ s/kare olarak ölçeklidir.



Şekil 7.19 D<sub>4</sub> diyodunun gerilim ve akım değişimleri. 100 V/kare, 10 A/kare ve 1  $\mu$ s/kare olarak ölçeklidir.



Şekil 7.20 Teklif edilen dönüştürücü ile sert anahtarlama dönüştürücünün verim eğrileri.

Önerilen dönüştürücünün tüm şebeke ve yük gerilimlerinde yumuşak anahtarlama ile başarılı bir şekilde çalıştığı gözlenmiştir. Şekil 7.20'den de görüldüğü gibi 500 W nominal çıkış gücü ve 100 kHz çalışma frekansında yeni dönüştürücünün toplam verimi % 98.3'e ulaşmaktadır. Önerilen dönüştürücünün verimi, düşük çıkış güçlerinde de sert anahtarlama dönüştürücülere göre daha yüksektir. Dönüştürücü kaybı sirkülasyon enerjisine dayandığı için çok düşük olup, yük akımı azaldıkça daha da düşer. Sonuç olarak, yeni ZVT-ZCT-PWM dönüştürücüde teorik analiz deneysel sonuçlar ile tam olarak doğrulanmıştır.

## 8. SONUÇLAR

Yumuşak anahtarlama, anahtarlama esnasında, elemanın maruz kaldığı akım ve gerilim değerleri ile akım ve gerilim yükselme hızlarının bastırılması, akım ve gerilim değişimlerinin şekillendirilmesi, anahtarlama kayıpları ile EMI gürültünün azaltılması ve anahtarlama enerjisinin yüke veya kaynağa transfer edilmesi fonksiyonlarını kapsar.

Son yıllarda, rezonans ve PWM tekniklerinin iyi yönlerinin birleştirilmesi düşüncesi ile ZVT ve ZCT teknikleri ortaya çıkmıştır. Her iki teknikte de bir yardımcı anahtar ve bir kısa süreli rezonans devresi kullanılır. ZVT ile ilettime girme ve ZCT ile kesime girme işlemlerinde mükemmel bir yumuşak anahtarlama sağlanır.

ZVT tekniğinin temelini, kısa süreli bir rezonans ile anahtar uçlarındaki gerilimin önceden sıfıra düşürülmesi, bu gerilimin bir süre sıfırda tutulması, sonra sinyal verilerek anahtarın ZVS ile ilettime sokulması işlemi oluşturur. Devrenin başlıca dezavantajları;

- 1) Yardımcı anahtar sert anahtarlama ile kesime girer.
- 2) Ana anahtarın kesime girme işlemi uçlarındaki paralel rezonans kondansatörünün sabit akımla şarjı ile sağlanır. Şarj süresi yük akımına bağlıdır ve hafif yüklerde çalışma özelliği kötüdür.
- 3) Yardımcı anahtarın parazitik kondansatörü ile rezonans endüktansı arasında yüksek frekanslı bir salınım oluşur.

ZCT tekniğinin temelini ise, yine kısa süreli bir rezonans ile anahtar içinden geçen akımın önceden sıfıra düşürülmesi, bu akımın bir süre sıfırda tutulması, sonra sinyal kesilerek anahtarın ZCS altında kesime sokulması işlemi oluşturur. Devrenin başlıca dezavantajları;

- 1) Yardımcı anahtarın kesime girmesi sert anahtarlama ile olur.
- 2) Ana anahtarda ilave bir akım stresi mevcuttur.
- 3) Ana anahtarın ilettime girmesi ve ana diyodun kesime girmesi de sert anahtarlama ile gerçekleşir.

Geliştirilmiş ZVT ve ZCT dönüştürücüler ile temel ZVT ve ZCT dönüştürücülerindeki problemler farklı yöntemlerle çözülmeye çalışılmıştır. Bu yöntemlerde hala bazı problemler ve anahtarlama kayıpları mevcuttur. Son yıllarda ZVT ve ZCT tekniklerinin iyi yönlerinin birleştirilmesi konusunda yapılan çalışmalar mevcuttur.

Bu doktora çalışmasında, ana anahtarın sıfır gerilim geçişi (ZVT) ile ilettime ve sıfır akım geçişi (ZCT) ile kesime girmesini sağlayan yeni bir aktif bastırma hücresi gerçekleştirilmiştir. Bastırma hücresi dönüştürücünün fiyatını ve karmaşıklığını arttırmadan sadece yarı rezonans

devresi ile gerçekleştirilir. Geliştirilen bastırma hücresinin kullanıldığı ZVT-ZCT-PWM dönüştürücü, daha önce sunulan ZVT ve ZCT dönüştürücülerin istenilen özelliklerine sahiptir ve problemlerini çözmektedir.

Yeni dönüştürücüde, bütün yarı iletken elemanlar yumuşak anahtarlama ile çalışır. Ana anahtar mükemmel bir şekilde ZVT ile ilettime ve ZCT ile kesime girer. Yardımcı anahtar ise ZCS ile ilettime ve ZCT ile kesime girer. Diğer elemanlar da yumuşak anahtarlama ile çalışır. Ana anahtar hiçbir ilave gerilime maruz kalmaz ve ana anahtardaki akım stresi makul seviyelerdedir. Ana diyot hiçbir ilave gerilim ve akıma maruz kalmamaktadır. Yardımcı anahtar üzerinde hiçbir ilave gerilim stresi yoktur.

Yeni dönüştürücü geniş bir şebeke ve yük gerilimi aralığında ve yüksek frekanslarda yumuşak anahtarlama ile çalışabildiği gibi aynı zamanda daha önce sunulmuş olan birçok ZVT ve ZCT dönüştürücü kadar ucuz ve basittir.

Önerilen bastırma hücresinin kullanıldığı yeni ZVT-ZCT-PWM yüksek çıkışlı DC-DC dönüştürücü devresinin çalışma prensibi ve etraflı bir kararlı durum analizi sunulmuştur. Bu analizi doğrulamak üzere laboratuvarında bir uygulama devresi gerçekleştirilmiştir.

Uygulama devresinden alınan sonuçlar ile teorik sonuçların tam olarak uyum içinde olduğu görülmüştür. Ana anahtarın tam ve mükemmel olarak ZVT ile ilettime ZCT ile kesime girdiği, yardımcı anahtarın ZCS ile ilettime ve ZCT ile kesime girdiği gözlenmiştir.

Sonuç olarak, geliştirilen bastırma hücresinin kullanıldığı yeni ZVT-ZCT-PWM yüksek çıkışlı dönüştürücü daha önce sunulan ZVT ve ZCT dönüştürücülerin istenilen özelliklerini taşımaktadır ve bu dönüştürücülerdeki problemleri çözmektedir. Dönüştürücü ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen dönüştürücünün çalışma prensibi ve teorik analizi 500 W ve 100 kHz'lik prototip ile tam olarak doğrulanmıştır. Ayrıca nominal çıkış gücünde dönüştürücü veriminin yaklaşık olarak % 98.3'e ulaştığı tespit edilmiştir.

Bu doktora çalışmasının aynı zamanda daha sonra yapılacak benzer çalışmalar yapacaklar için iyi bir referans olacağı düşünülmektedir. Gelecekteki benzer çalışmalar, frekans ve güç ile güç yoğunluğu daha yüksek, yapısı daha basit ve daha ucuz olan DC-DC dönüştürücülerin geliştirilmesi şeklinde sürecektir. Ayrıca, bu ve benzeri yumuşak anahtarlama tekniklerinin, güç faktörü düzeltilmesi ve inverter devreleri gibi diğer dönüştürücülere de yaygın olarak uygulanması beklenmektedir.



**KAYNAKLAR**

- Bakan, A.F., Bodur, H., ve Aksoy, İ., (2005), "A Novel ZVT-ZCT PWM DC-DC Converter", 11th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2005), Dresden, 1-8, September.
- Bodur, H., Aksoy, İ., ve Bakan, A.F., (2005), "PWM DC-DC Dönüştürücülerde ZVT ve ZCT Tekniklerine Genel Bir Bakış", Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi, İstanbul, 390-393, Eylül.
- Bodur, H., Aksoy, İ., ve Akın, B., (2002), "DC-DC Dönüştürücülerde Yumuşak Anahtarlama Teknikleri", Kaynak Elektrik, Sayı 158, 100-108, Haziran.
- Bodur, H., Aksoy, İ., ve Akın, B., (2002), "Anahtarlama ve Rezonanslı Dönüştürücüler", Kaynak Elektrik, Sayı 160, 104-112, Ağustos.
- Bodur, H., ve Bakan, A.F., (2002), "A New ZVT-PWM DC-DC Converter," IEEE Trans. on Power Electron., vol. 17, 40-47, January.
- Bodur, H., ve Bakan, A.F., (2004), "A New ZVT-ZCT-PWM DC-DC Converter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, 676-684, May.
- Bodur, H., Bakan, A.F., ve Baysal, M., (2003), "A Detailed Analytical Analysis of a Passive Resonant Snubber Cell Perfectly Constructed for a Pulse Width Modulated DC-DC Buck Converter," Electrical Engineering, Springer-Verlag, vol. 85, 45-52, February.
- Bodur, H., Sarul, M. H., ve Bakan, A. F., (1999), "A Passive Lossless Snubber Cell Design For An Ohmic Loaded PWM IGBT Chopper Fed By a Diode Bridge From AC Mains," in Proc. Int. Conf. Elec. Electron. Eng. (ELECO'99), Bursa, Turkey, 440-444, December.
- Cho, J.G., Baek, J.W., Rim, G.H., ve Kang, I., (1998), "Novel Zero-Voltage-Transition PWM Multiphase Converters," IEEE Trans. on Power Electron., vol. 13, 152-159, January.
- Ferraro, A., (1982), "An Overview Of Low-Loss Snubber Technology For Transistor Converters", IEEE Power Electron. Spec. Conf., 466-477.
- Fuentes, R.C., ve Hey, H.L., (1999), "An Improved ZCS-PWM Commutation Cell for IGBT's Application", IEEE Transactions on Power Electronics, vol.14, issue 5, 939 - 948, September.
- Grigore, V., ve Kyyra, J., (1998), "A New Zero-Voltage-Transition PWM Buck Converter," in Proc. 9<sup>th</sup> Mediterranean Electrotechnical Conf. (MELECON'98) , Tel Aviv, Israel, vol. 2, 1241-1245.
- Hua, G., Leu, C.S., Jiang, Y., ve Lee, F.C.Y., (1994), "Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters", IEEE Trans. on Power Electron., vol.9, no.2, 213-219, March.
- Hua, G., Yang, E.X., Jiang, Y., ve Lee, F.C.Y., (1994), "Novel Zero-Current-Transition PWM Converters", IEEE Trans. on Power Electron., vol.9, no.6, 601-606, November.
- Huang, W., ve Moschopoulos, G., (2006), "A New Family of Zero-Voltage-Transition PWM Converters with Dual Active Auxiliary Circuits", Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 21, 370-379, March.
- Jain, N., Jain, P., ve Joós, G., (2001), "Analysis of a Zero Voltage Transition Boost Converter using a Soft Switching Auxiliary Circuit with Reduced Conduction Losses", in IEEE Power Electronics Specialists Conference, vol.4, 1799-1804;

- Kim, T.W., Kim, H.S., ve Ahn, H.W., (2000), "An Improved ZVT PWM Boost Converter," in Proc. 31th Power Electron. Spec. Conf. (PESC'00), Galway, Ireland, vol. 2, 615-619.
- Lee, D.Y., Lee, B.K., Yoo, S.B., ve Hyun, D.S., (2000), "An Improved Full-Bridge Zero-Voltage-Transition PWM DC/DC Converter with Zero-Voltage / Zero-Current Switching of the Auxiliary Switches," IEEE Trans. on Ind. Applicat., vol. 36, 558-566, Mar. / Apr.
- Lee, D.Y., Lee, M.K., Hyun, D.S., ve Choy, I., (2003), "New Zero-Current-Transition PWM DC/DC Converters Without Current Stress," IEEE Transactions on Power Electronics, vol.18, issue 1, 95-104, January.
- Mao, H., Lee, F.C.Y., Zhou, X., Dai, H., Cosan, M., ve Boroyevich, D., (1997), "Improved Zero-Current-Transition Converters for High-Power Applications," IEEE Trans. on Ind. Applicat., vol.33, no.5, 1220-1232, September/October.
- Martins, M.L.; Grundling, H.A.; Pinheiro, H.; Pinheiro, J.R.; ve Hey, H.L.; (2002), "A ZVT PWM Boost Converter Using an Auxiliary Resonant Source", Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2002, Seventeenth Annual IEEE Volume 2, 1101-107, March.
- Menegaz, J.M.P., Co, M.A., Simonetti, D.S.L., ve Vieira, L.F., (1999), "Improving the operation of ZVT DC-DC Converters," in Proc. 30<sup>th</sup> Power Electron. Spec. Conf. (PESC'99), Charleston, vol.1, 293-297.
- Moschopoulos, G., Jain, P., ve Joos, G., (1995), "A Novel Zero-Voltage Switched PWM Boost Converter", IEEE Trans.Power Electron., vol. 2, 694-700, June.
- Moschopoulos, G.; Jain, P.; Yan-Fei Liu; ve Joos, G., (1996), "A Zero-Voltage Switched PWM Boost Converter with an Energy Feedforward Auxiliary Circuit", Power Electronics Specialists Conference, PESC'96 Record., 27th Annual IEEE, vol.1, 76 - 82, June.
- Moschopoulos, G., ve Huang, W., (2005), "A New Family of Zero-Voltage-Transition PWM Converters with Dual Active Auxiliary Circuits", Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2005, vol.2, 1251- 257, March.
- Obdan H., Bodur H., Aksoy İ., Bekiroğlu N., ve Yıldırım G., (2005), "A New Parallel Resonant DC Link for Soft Switching Inverters", Electric Power Components and Systems, vol.33, no.2, 159-169, February.
- Das, P., ve Moschopoulos, G., (2007), "A Comparative Study of Zero-Current-Transition PWM Converters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.54, issue 3, 1319-1328, June.
- Das, P., Moschopoulos, G., (2007), "A Zero-Current-Transition Converter with Reduced Auxiliary Circuit Losses", IEEE Transactions on Power Electronics, vol.22, issue 4, 1464-1471, July.
- Smith, K.M., ve Smedley, K.M., (1997), "A Comparison of Voltage-Mode Soft-Switching Methods for PWM Converters," IEEE Trans. on Power Electron., vol. 12, 376-386, March.
- Smith, K.M., ve Smedley, K.M., (1999), "Properties and Synthesis of Passive Lossless Soft-Switching PWM Converters", IEEE Trans. on Power Electron., vol.14, no.5, 890-899, September.
- Stein, C.M.O., ve Hey, H.L., (2000), "A True ZCZVT Commutation Cell for PWM

Converters,” IEEE Trans. on Power Electron., vol. 15, 185-193, January.

Tseng, C.J., ve Chen, C.L., (1998), “Novel ZVT-PWM Converters with Active Snubbers,” IEEE Trans. on Power Electron., vol. 13, 861-869, September.

Wang, C.M., (2003), “Zero-Voltage-Transition PWM DC-DC Converters Using A New Zero-Voltage-Switching PWM Switch Cell”, The 25th International Telecommunications Energy Conference, INTELEC '03, 784 - 789, October.

Wang, C.M., (2006), “Novel Zero-Voltage-Transition PWM DC-DC Converters”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.53, issue 1, 254 - 262, February.

Yu, H., Song, B.M., ve Lai, J.S., (2002), “Design of a Novel ZVT Soft-Switching Chopper,” IEEE Trans. on Power Electron., vol. 17, 101-108, January

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	02.01.1977	
Doğum yeri	Almanya	
Lise	1990-1994	Yenimahalle Anadolu Teknik Lisesi
Lisans	1995-1999	Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak. Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1999-2001	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora	2001-	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
<b>Çalıştığı kurum</b>		
	1999-	YTÜ Elektrik Müh. Böl. Araştırma Görevlisi